

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DE PEQUENOS DIÂMETROS
DE FIOS METÁLICOS PARA APLICAÇÃO INDUSTRIAL**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA PARA
A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

MARCELO FERREIRA GUIMARÃES

FLORIANÓPOLIS, DEZEMBRO 1992

UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DE PEQUENOS DIÂMETROS
DE FIOS METÁLICOS PARA APLICAÇÃO INDUSTRIAL

MARCELO FERREIRA GUIMARÃES

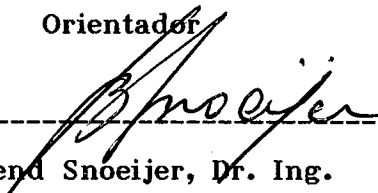
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng.
Orientador

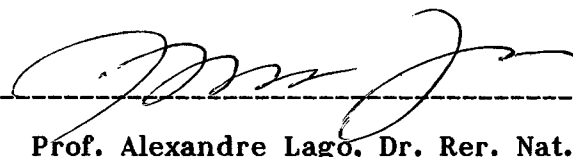


Prof. Berend Snoeijer, Dr. Ing.
Coordenador

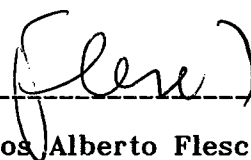
BANCA EXAMINADORA



Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng.



Prof. Alexandre Lago, Dr. Rer. Nat.



Prof. Carlos Alberto Flesch, M. Eng.

À minha querida esposa Márcia que sempre me apoio
nas horas difíceis e ao meu filho Vítor.

ESCLARECIMENTOS

A parte teórica e experimental do presente trabalho foi desenvolvida no NIST (National Institute of Standards and Technology) - Precision Engineering Division - Dimensional Metrology Group, E.U.A.

A orientação técnico-científica desta parte do trabalho foi feita pelo Dr. Theodore Doiron, pesquisador do NIST. A coorientação foi prestada pelo Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr. da Universidade Federal de Santa Catarina.

Por motivos maiores, o Dr. Theodore Doiron não pôde vir ao Brasil e participar da banca examinadora deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à Fundação CERTI pelo apoio prestado na realização deste trabalho. Agradecimentos também ao CNPq (Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento) pelo suporte financeiro e ao NIST (National Institute of Standards and Technology) pelo seu suporte financeiro e de infra-estrutura para realização deste trabalho em seus laboratórios.

Agradeço a contribuição técnica e incentivo dos pesquisadores e técnicos do NIST :

- Dr. Jack Stone
- Dr. Howard Harary,
- Sr. A. W. Hartman,
- Eng. Chien Ming Wu,
- Sr. C. Leon Carroll, Jr.,
- Sr. Jay H. Zimmerman,
- Sr. John Stoup

Agradeço também a ajuda do acadêmico Alexander Weiss pela confecção das figuras.

Agradecimento especial aos senhores:

- Sr. Ralph Veale, por sua atenção e apoio durante meu período de trabalho no Dimensional Metrology Group no NIST - E. U. A,
- Dr. Thodore Dioron, por sua inteligente e importante contribuição técnica na orientação deste trabalho,
- Dr. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., por sua orientação na parte do trabalho realizado no Brasil e pelo apoio e incentivo durante o desenvolvimento deste trabalho.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos do trabalho	2
1.3 Apresentação do trabalho	2
1.4 Comentários	3
2. MEDIÇÃO DE PEQUENOS DIÂMETROS	4
2.1 Fabricação de fios metálicos finos	4
2.1.1 Processos de fabricação	4
2.1.2 Inspeção de qualidade na fabricação de fios finos	10
2.2 Medição de pequenos diâmetros em processo	14
2.3 Métodos ópticos para medição de pequenos diâmetros	15
2.3.1 Métodos da projeção de sombra	17
2.3.2 Métodos do espalhamento de luz (scattering techniques)	20
2.3.3 Comparação entre métodos	24
2.4 Princípio de medição adotado	28
2.4.1 Estado da arte em medidores de diâmetro por difração	28
2.4.2 Discussão geral sobre o projeto do sistema medição de pequenos fios metálicos	33
3. SISTEMA DE MEDIÇÃO PROPOSTO	34
3.1 Difração em pequenos diâmetros	34
3.1.1 Teorias envolvidas	35
3.1.2 Aproximações no estudo da difração causado por um cilindro	36
3.2 Configuração proposta	39
3.2.1 Descrição geral	39
3.3 Formulação matemática da configuração adotada.	40
3.3.1 Modelamento matemático	40
3.3.2 Correlação do perfil de irradiância do feixe com a potência do laser	43
3.3.3 Correção de reflexão	45

	vii
3.3.4 Considerações finais sobre o modelo usado	46
3.3.5 Aquisição de sinal pelo CCD	48
3.4 Processamento de sinal	50
3.4.1 Processamento estático	51
3.4.2 Processamento dinâmico	53
3.5 Módulos do sistema	56
4. DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DE ERROS	58
4.1 Dimensionamento geral do sistema de medição proposto	58
4.1.1 Laser	59
4.1.2 Lente	62
4.1.3 Sensor CCD	64
4.2 Simulação computacional do sistema de medição de pequenos diâmetros	66
4.3 Fontes de erros	69
4.4 Análise de erros	71
4.4.1 Quantificação dos erros	71
4.4.2 Contabilização dos erros	75
5. PROTÓTIPO FUNCIONAL	76
5.1 Considerações gerais de projeto	76
5.2 Módulos	77
5.2.1 Módulo cabeçote de medição	79
5.2.2 Módulo aquisição/processamento e indicação	86
5.3 Funcionamento e operação do protótipo funcional	90
6. TESTES EXPERIMENTAIS	91
6.1 Testes de ajustes	91
6.1.1 Potência do laser	91
6.1.2 Focagem do sistema	92
6.1.3 Alinhamento dos componentes ópticos	92
6.1.4 Posicionamento do diâmetro a ser medido na janela de medição	95
6.1.5 Ajuste iniciais da placa de processamento	97
6.1.6 Ajuste no algoritmo de processamento	99

	viii
6.2 Testes metrológicos	100
6.2.1 Ensaios estáticos	100
6.2.2 Padrões	100
6.2.3 Procedimentos de ensaio	104
6.2.4 Resultados da calibração	104
6.2.5 Análise dos resultados da calibração	106
6.3 Testes operacionais	111
6.3.1 Vibrações do fio no campo de medição	112
6.3.2 Análise de resultados	113
6.4 Contabilização dos erros	114
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	116
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	119
ANEXO I	126

SIMBOLOGIA

SÍMBOLO		UNIDADE
E_0	amplitude do campo de onda plana	$(W/m^2)^{1/2}$
d	diâmetro do fio	mm
f	distância focal	mm
λ	comprimento de onda	μm
P	potência do laser	mW
I	irradiância	W/m^2
v	tensão elétrica quando o pixel está saturado	V
s	exposição de saturação	joule/ m^2
t	tempo de integração	segundo
R	sensibilidade espectral	
n	ordem de franja	
y	posição ao longo do fotodetector linear CCD	mm
p	passo entre pixels do CCD	μm
α, β	ângulo do feixe difratado	radiano

RESUMO

Neste trabalho, são apresentadas e discutidas diversas técnicas de medição de pequenos diâmetros de fios metálicos e fibras ópticas em ambiente industrial e é feita uma comparação entre os diferentes métodos.

Um sistema de medição de pequenos fios metálicos para aplicação industrial é proposto utilizando-se o princípio óptico da difração de Fraunhofer. O padrão de difração, gerado por um pequeno fio exposto a um feixe colimado de laser, é adquirido por uma câmera industrial CCD que está interfaceada com um computador tipo PC, através de uma placa de processamento de sinais. Através do processamento do sinal gerado pela câmera, obtém-se o valor do diâmetro do fio.

O processo de medição é dividido em duas etapas que utilizam respectivamente dois métodos diferentes para a medição do pequeno diâmetro, tendo-se como objetivo aumentar a velocidade de medição, mantendo-se valores baixos de incerteza de medição. Na primeira etapa é usado o método chamado "estático", onde o valor absoluto do diâmetro é medido. Na segunda etapa é utilizado o método chamado "dinâmico", onde a medição relativa do diâmetro é executada, acelerando o processo de medição e mantendo a precisão da primeira etapa.

Um protótipo do sistema de medição foi projetado e construído a partir de uma análise criteriosa dos requisitos de aplicação industrial. O dimensionamento dos componentes do protótipo do sistema de medição considera uma análise detalhada de erros e dos requisitos metrológicos e operacionais desejáveis ao sistema.

Fios com diâmetros entre 10 e 350 μm podem ser medidos com resolução de 0.06%. A incerteza de medição obtida são menores que $\pm 0.5\%$ para os fios entre 90 e 350 μm . Para fios com menor diâmetro, o sistema de medição deve ser calibrado para a eliminação de erros sistemáticos. A dispersão de medição estimada é de $\pm 0.25\%$. O sistema proposto é capaz de medir diâmetros com a taxa de leitura de 1000 Hz e também é capaz de medir fios com vibrações mecânicas dentro de uma região quadrada de 1 mm^2 de área. O sistema é compacto e não possui peças em movimento.

ABSTRACT

Several techniques of measuring fine wire and optical fiber diameters in the industrial environment are presented in this work. Different methods are shown and their main features are compared.

A fine wire diameter measurement system for on-line monitoring has been proposed by using a Machine Vision System and a visible diode laser. The system uses the Fraunhofer diffraction principle. The diffraction pattern, generated by a small wire exposed to a collimated laser beam, is acquired by a CCD industrial camera which is connected to a processing board inside a PC computer. By processing the camera's signal, one is able to measure the wire's diameter.

Two different methods of measuring the diameters, static and dynamic, have been proposed in order to get high precision and high measurement rate. Using the static method, one measures the absolute value of the diameter with high precision and using the dynamic method, one just measures its variation with higher velocity of measurement.

A prototype has been developed considering all the requirements for industrial application. The prototype's components are designed and specified after a very complete study of errors and analysis of the desired performance and operational constraints.

Wires with diameter from 10 to 350 μm have been measured by this system with 0.06% resolution. The accuracy is less than $\pm 0.5\%$ over a range of 90–350 μm diameter. For thinner wires, the measurement should be calibrated to eliminate the systematic errors. The estimate random errors are $\pm 0.25\%$. The instrument is able to measure the wire diameter at a 1000 Hz rate and allows it to move laterally in a 1 mm square window maintaining the above accuracy. The system is compact and there are no moving parts.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

A indústria de fios e cabos é um importante setor industrial brasileiro. Diversos tipos diferentes de fios são produzidos para várias aplicações. Fios metálicos com diâmetros menores que 300 μm são produzidos para fabricação de lâmpadas incandescentes, enrolamentos de micromotores, componentes eletrônicos, fabricação de termopares e resitores. Nessas aplicações são utilizados materiais caros como tungstênio, molibidênio, aço inox e ouro.

O diâmetro é, para esses fios, uma importante característica geométrica que deve ser mantida constante ao longo de toda sua extensão para que se obtenha a qualidade necessária para a transmissão de sinal e energia. Variações indesejáveis no diâmetro do fio causam perdas de energia, aquecimentos, concentrações de tensões e desperdícios de materiais. Alguns desses fios são revestidos por uma camada de polímero que tem a função de isolamento. Variações na espessura desse isolante podem causar problemas na transmissão de sinais, ruídos e variações no isolamento elétrico.

Para a indústria de fios e cabos, o diâmetro dos pequenos fios metálicos é importante parâmetro no controle de qualidade na fabricação de tais fios. Atualmente micrômetros a laser são utilizados como medidores de diâmetro junto ao processo de fabricação de fios metálicos como parte de um sistema "on-line" automatizado de controle de qualidade no processo. Geralmente, as características metrológicas e operacionais dos micrômetros a laser se degradam quando estes são aplicados na medição de diâmetros menores que 0.3 mm.

A principal motivação deste trabalho está relacionada com a melhoria dos sistemas de medição de pequenos diâmetros que atualmente são empregados na monitoração e controle de qualidade na produção de fios especiais como os citados acima.

1.2 Objetivos do trabalho

O objetivo deste trabalho foi de projetar, implementar e avaliar um sistema de medição de diâmetros de pequenos fios metálicos para aplicação em ambiente industrial.

Este objetivo foi atingido através da execução das seguintes macro-etapas:

- levantamento e estudo do estado da arte das técnicas de medição de pequenos diâmetros;
- estudo e definição dos requisitos de medição de pequenos diâmetros em ambiente industrial;
- estudo e seleção de um princípio de medição mais adequado para o desenvolvimento de um sistema de medição de pequenos fios metálicos;
- desenvolvimento de um protótipo para teste e avaliação do princípio e metodologias de medição;

1.3 Apresentação do trabalho

Este trabalho está dividido em 8 capítulos que se distribuem da seguinte forma:

- o capítulo 1 apresenta uma breve introdução ao trabalho destacando-se o seu objetivo.
- o capítulo 2 apresenta informações a respeito do processo de fabricação e o estado da arte na medição de pequenos diâmetros. São destacados os requisitos metrológicos e operacionais na medição de pequenos fios metálicos na indústria.
- no capítulo 3 é proposto um sistema de medição de pequenos fios metálicos e no capítulo 4 descreve-se todo o dimensionamento e análise de erros desse sistema.

- no capítulo 5 é apresentado o protótipo desenvolvido para teste do princípio e metodologias de medição desenvolvidas. No capítulo 6 os resultados dos testes experimentais são apresentados e analisados.

- no capítulo 7 são apresentadas as conclusões finais e recomendações para a continuidade do trabalho. Por fim, no capítulo 8, são relacionadas as referências bibliográficas utilizadas neste trabalho

1.4 Comentários

Este trabalho foi desenvolvido no NIST (National Institute of Standards and Technology - USA) durante um período de um ano. Neste período de tempo, o estudo teórico/computacional e os experimentos foram realizados utilizando-se os recursos infraestruturais disponíveis da Divisão de Engenharia de Precisão do NIST. Este trabalho se enquadrava em uma linha de pesquisa dessa divisão do NIST que objetivava o desenvolvimento de medidores de pequenos diâmetros de arames padrões.

2. MEDIÇÃO DE PEQUENOS DIÂMETROS

Diferentes métodos têm sido aplicados na medição de pequenos diâmetros. Vários parâmetros como o material, condições ambientais e processo de fabricação podem influenciar a escolha das melhores técnicas e instrumentos para medição de pequenos diâmetros.

Neste capítulo são apresentados os processos de fabricação de fios metálicos finos como também os métodos hoje utilizados para o controle de qualidade de seus diâmetros. Também são apresentados diferentes métodos para medição de fibras ópticas permitindo-se a comparação entre os diferentes princípios de medição utilizados. A partir dessa comparação é escolhido o princípio estudado com maior profundidade e se define os requisitos principais do sistema de medição de pequenos diâmetros de fios metálicos para aplicação industrial.

2.1 Fabricação de fios metálicos finos

2.1.1 Processos de fabricação

Dentre os processos de conformação dos metais, os processos de extrusão e trefilação são os utilizados na fabricação de fios. Como característica comum aos dois processos, existe uma redução na área da seção transversal do material que alimenta o processo quando este passa por uma estrição chamada " fieira ". Para o caso de fios de seção circular, esta redução significa a diminuição do diâmetro.

Na extrusão, o fio é empurrado contra a estrição, significando que existe uma diferença de pressão positiva entre a entrada e saída da fieira. Na trefilação, o fio é puxado na saída da fieira definindo uma diferença de pressão negativa entre a entrada e saída da fieira /1/. A figura 2.1 representa a redução no diâmetro de um fio quando conformado através de uma fieira.

A conformação do fio, oriunda da deformação plástica de seu material, pode ser a frio ou a quente. Processos modernos de extrusão e trefilação utilizam a técnica de conformação a frio pois o produto apresenta melhor qualidade em termos de resistência mecânica, melhor precisão dimensional, melhor qualidade de acabamento superficial e maior economia de matéria prima.

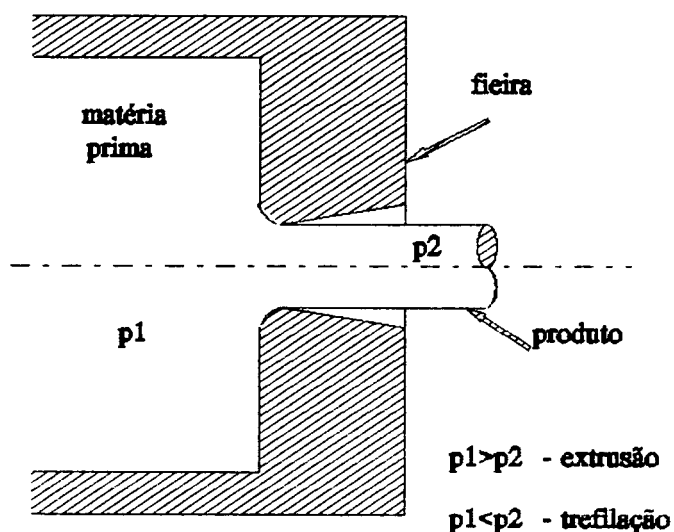


Figura 2.1 - Conformação através de uma fiação

Por causa do limite da força de puxamento no processo de trefilação, apenas pequenas reduções de diâmetros podem ser realizadas em uma passagem pela fiação. Para se ter grandes reduções do diâmetro do fio, é necessário que se tenha inúmeras passadas por fiação com diâmetros diferentes. Tal problema não acontece no processo de extrusão onde, em uma única passada, pode-se ter uma grande redução de diâmetro. A desvantagem do processo de extrusão é que a produção não é contínua, como é o caso da trefilação. Apenas comprimentos de fios finitos podem ser produzidos pelo processo de extrusão /1/. Processos modernos híbridos (combinação de extrusão e trefilação) são classificados como processos semi-contínuos, que significa que grandes comprimentos de fios são produzidos com apenas uma passada pela fiação mas esse comprimento é finito.

Os dois processos atualmente utilizados na fabricação de fios finos são a trefilação e a extrusão hidrostática-trefilação, que é uma combinação dos processos de extrusão e trefilação. Os dois processos são a seguir discutidos:

a) Trefilação

A matéria prima para a trefilação geralmente é o fio extrudado. Todos os tipos de materiais dúcteis podem ser processados na trefilação. A figura 2.2 apresenta um esquema simplificado do processo de trefilação.

A matéria prima, que deve estar limpa, primeiro passa por um recipiente que contém um lubrificante que pode ser sabão. A extremidade do fio é então passado através da fieira e presa a um tambor que realiza a força de puxamento. O fio trefilado, com o diâmetro reduzido, é então enrolado ao tambor. A velocidade do processo pode ser alta.

Como exemplo, a trefilação a frio de fio de cobre em uma espira enrolada sobre um tambor pode chegar a 6000 m/min (100 m/s) /1/. O limite de velocidade é determinado pela força centrífuga sobre o fio enrolado ao tambor. Essa força faz com que o fio tenda a se afastar do tambor cancelando dessa forma a força de puxamento exercida pelo atrito entre tambor e fio trefilado.

Para se fabricar fios finos por trefilação, uma série de fieiras podem ser usadas em série. Fios finos, com 0.01 mm de diâmetro, podem ser produzidos por esse processo. O material das fieiras usado nestes casos é o diamante. Fieiras modernas têm sido fabricadas com diamantes sintéticos favorecendo à diminuição dos seus custos.

Em geral a forma geométrica da entrada de uma fieira é cônica e da saída é um cilindro. Após o desgaste da face cônica, a sua geometria pode ser reestabelecida através de usinagem ou polimento e a vida do componente pode ser aumentada. Se o diâmetro da parte cilíndrica da fieira se altera pelo desgaste, uma usinagem ou polimento podem ser feitos para o aumento do diâmetro para o próximo valor de fio mais grosso a ser produzido e a fieira pode ser usada novamente.

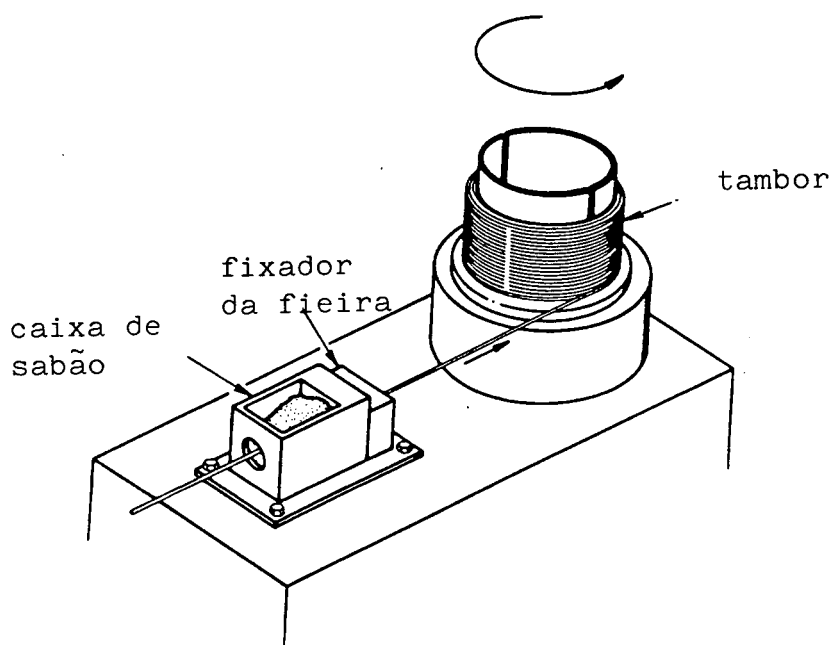


Figura 2.2 - Equipamento para trefilação de fios

b) Extrusão hidrostática-trefilação

O processo de extrusão hidrostática-trefilação é um processo híbrido que combina a extrusão e a trefilação. É um processo de fabricação de fios onde parte da energia necessária para que o fio passe pela fieira é fornecida por um fluido pressurizado. Outra parte da energia é fornecida por um tambor que exerce uma força de puxamento do fio extrudado, portanto o processo é uma combinação de extrusão e trefilação.

A figura 2.3 apresenta os principais componentes do processo. Em uma câmara com fluido em alta pressão, é colocado um rolo de fio que deverá ter seu diâmetro reduzido. Na parte inferior dessa câmara tem-se a fieira. Na parte externa à câmara tem-se um tambor onde o fio de menor diâmetro é puxado e enrolado.

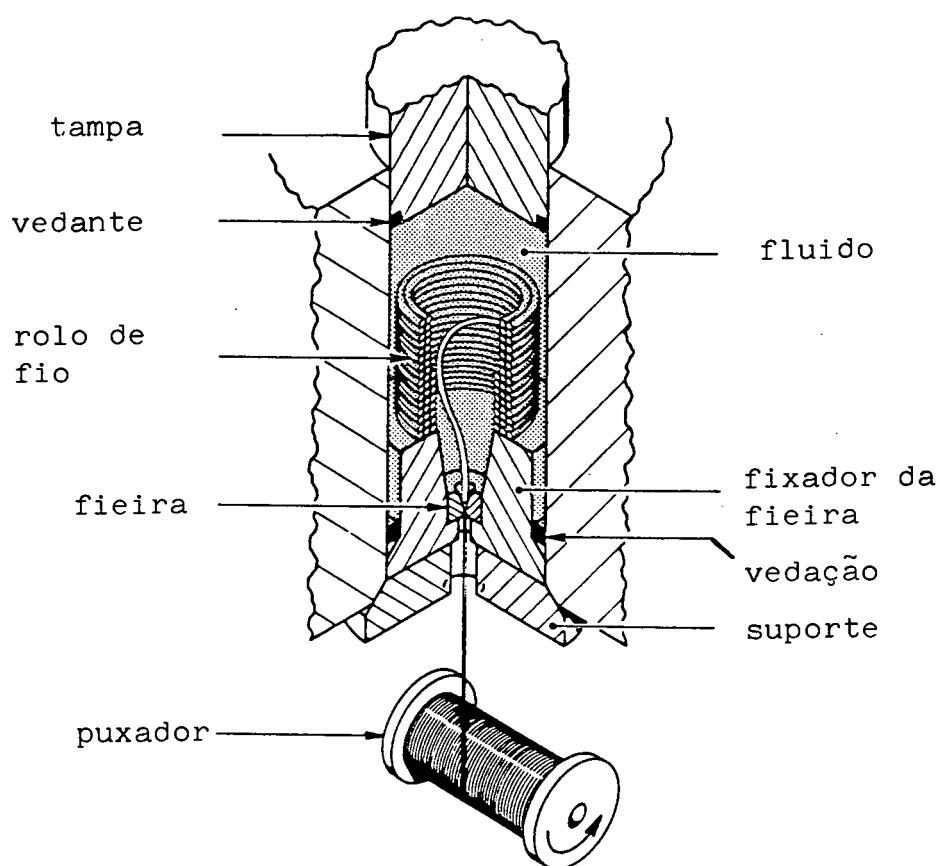


Figura 2.3 - Esquema do processo de extrusão hidrostática-trefilação

Quando a pressão na câmara é aumentada para cerca de 90% da pressão necessária para que o processo de extrusão se inicie, o tambor é acionado para que forneça o restante de energia necessário para que o fio, de diâmetro reduzido, seja produzido. A pressão da câmara fornece então a força bruta para uma grande redução de diâmetro na fieira, enquanto que o tambor puxador fornece somente uma quantidade mínima de energia. Com isso o tambor possibilita o controle fino de velocidade do processo, importante parâmetro para a qualidade dimensional e superficial do fio /1/.

Quando o processo se inicia, um filme de fluido se forma entre o fio e a fieira havendo como consequência a queda da força de atrito. A espessura do filme do fluido aumenta com o incremento da velocidade do processo até que se atinja uma velocidade, chamada "velocidade crítica", e tem-se a completa separação do fio da fieira. Aumentando-se ainda mais a velocidade do processo, a força de atrito também aumenta por causa da força de arrasto no fluido.

O fluido geralmente usado é um tipo de querosene com propriedades especiais /1/. Para fluidos com baixa viscosidade, a velocidade crítica é alta e pode ser entre 300 a 3000 m/min (5 a 50 m/s). As pressões exercidas sobre esses fluidos são altas chegando até 3000 MPa. A propriedade de aumento da ductibilidade dos materiais a altas pressões, favorece o processo de extrusão/1/.

c) Comparação entre os métodos

A figura 2.4 mostra um quadro comparativo de alguns dos principais parâmetros relacionados com o processo de fabricação de fios finos através da conformação mecânica.

O processo de extrusão hidrostática-trefilação apresenta vantagens em relação ao processo de trefilação quanto à qualidade dimensional e superficial dos produtos. Apesar de não ser um processo contínuo, a extrusão hidrostática-trefilação é considerado um processo semi-contínuo devido às poucas interrupções necessárias para a recarga de matéria prima no processo. Para produção de fios finos, o processo de extrusão hidostática-trefilação é atualmente o mais utilizado /1/ .

Parâmetro Processo	Comprimento do produto	Redução possível	Velocidade fabricação	Qualidade dimensional
Trefilação	Ilimitado	Pequena	Alta	Boa
Extrusão hidrostática- trefilação	Muito longo (até 160 km/carga)	Moderada a grande	Restrita ^A	Muito boa

^A Depende do diâmetro do fio: para diâmetros de 40 µm, velocidades de 1300 m/min (21.7 m/s) são encontradas /1/.

Figura 2.4 - Comparação qualitativa dos processos de fabricação de fios finos

2.1.2 Inspeção de qualidade na fabricação de fios finos

Devido ao fato de o processo de extrusão hidroestática-trefilação ser o mais utilizado, como foi visto no item anterior, as características desse processo são consideradas neste trabalho como importantes parâmetros para definição de requisitos de um sistema de controle de qualidade na produção de fios metálicos finos. Os fios de seção circular são os de interesse.

A qualidade de um produto fabricado por um processo semi-contínuo, como é o caso do processo de fabricação de fios finos, é dependente do controle e monitoração de vários parâmetros diferentes presentes no processo. Uma importante característica de um processo semi-contínuo é a produção de grande volume de um único produto. A figura 2.5 apresenta o processo semi-contínuo no contexto dos demais processos de fabricação. O controle de processo e sua automação são atividades perfeitamente adequadas e necessárias à melhoria da qualidade do produto /2/.

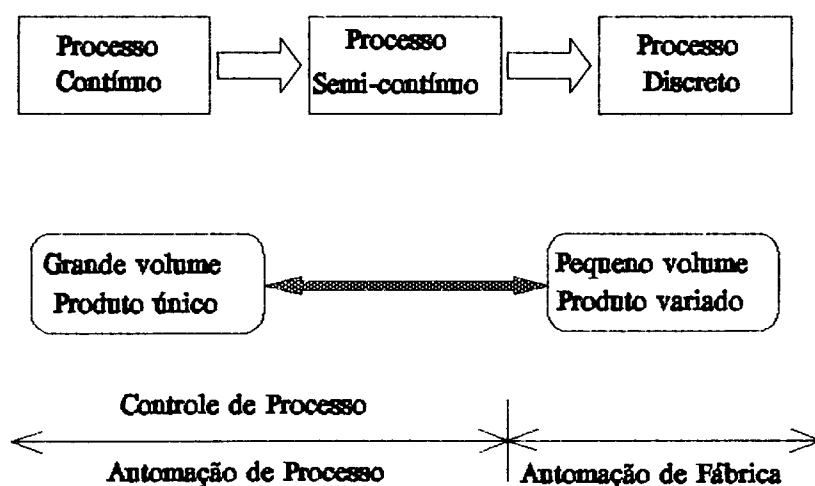


Figure 2.5 – Automação em processos de fabricação

No controle de processo automático, uma das atividades típicas realizadas é o controle de uma variável do processo por um esquema de realimentação (feedback). Esta variável de interesse é um importante parâmetro que caracteriza a qualidade do processo de fabricação. Para se controlar essa variável, é necessário primeiro medi-la através de um sistema de medição. A figura 2.6 apresenta um diagrama de bloco de um sistema de controle por realimentação simplificado destacando seus principais elementos /4/.

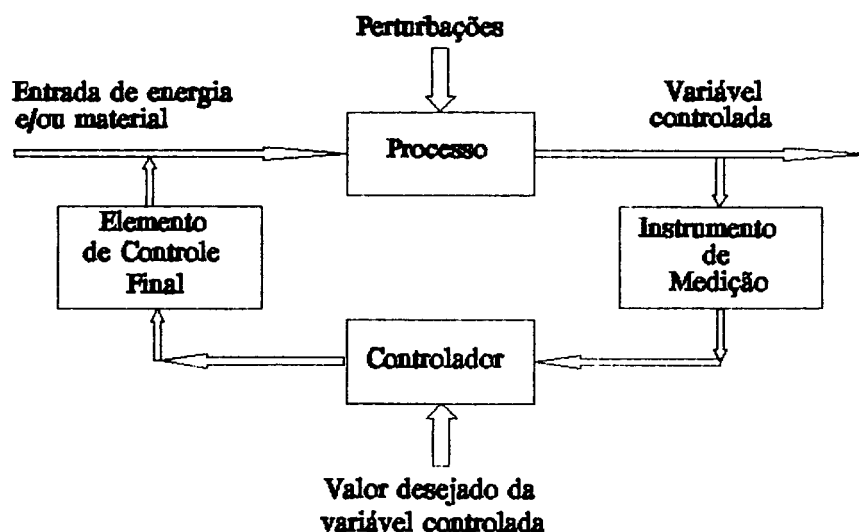


Figura 2.6 – Sistema de controle por realimentação

A definição das variáveis de controle em um processo de fabricação é uma importante tarefa para um projeto de sistema de inspeção de qualidade. Todos os parâmetros que influenciam o processo devem ser considerados e estudados para se conhecer a função transferência entre a entrada e saída do processo. A partir desse estudo, pode-se definir as variáveis de controle.

No caso da produção de fios metálicos finos, uma série de parâmetros influenciam as características do produto final /1/. Dentre eles destacam-se :

- pressão de extrusão
- geometria da fieira
- viscosidade do fluido lubrificante
- velocidade de puxamento do fio

Se todos esses parâmetros são mantidos constantes e se a velocidade de produção é a velocidade crítica, onde se tem o descolamento do fio em relação à fieira explicado no item 2.1.1.b, a qualidade dimensional e superficial do fio produzido é máxima. Variações nesses parâmetros, causadas por perturbações ao processo, poderão influenciar a qualidade final do produto. A referência /1/ apresenta diversas equações matemáticas e gráficos que modelam a relação entre

os diversos parâmetros do processo de fabricação e suas relações com as características geométricas e superficiais do fio.

Para uma série de aplicações, como fios finos aplicados na indústria de semi-condutores /1/ e lâmpadas elétricas /5/, a homogeneidade dimensional e superficial definem a qualidade dos fios, pelo fato desses parâmetros serem responsáveis pela eficácia e vida dos componentes produzidos por estas indústrias citadas.

No processo de extrusão hidrostática-trefilação, o diâmetro do fio produzido pode ser considerado como uma variável de controle do processo e a sua monitoração fornece informações sobre a estabilidade e qualidade do processo de fabricação.

Certas características do processo de extrusão hidrostática-trefilação, como alta velocidade de produção, pequena dimensão dos fios, vibrações mecânicas dos mesmos na saída da fieira etc, são condições de contorno que dificultam o desenvolvimento de um sensor adequado à monitoração do diâmetro produzido.

Certos fabricantes de extrusoras /1/ não oferecem sistemas de controle automático do processo. A estabilidade do processo e homogeneidade do diâmetro nestes casos são obtidas em períodos de tempo quando não existem perturbações externas, caracterizando um processo de malha aberta.

A inspeção da qualidade do diâmetro do fio produzido nestes casos é feita depois da sua produção (off-line). O fio é cortado aleatoriamente em um pedaço de 200 mm e depois sua massa é medida em uma balança de precisão e, através do conhecimento da densidade de massa, o valor do diâmetro é determinado /5/.

As desvantagens desse método são evidentes. Dentre elas cabe destacar:

- incapaz de realimentar o processo,
- desperdício de matéria prima e energia pela rejeição do lote, caso o diâmetro do fio esteja fora das especificações,
- menor qualidade de produção,
- ensaio destrutivo,
- menor confiabilidade,
- muito tempo gasto na medição.

A inspeção automatizada do diâmetro do fio é a solução para tais problemas. Considerando-se o diagrama da figura 2.6, um instrumento de medição de diâmetro pode ser colocado na saída da fieira e gerar um sinal proporcional ao valor do diâmetro. Esse sinal é enviado a um controlador que o processa e decide se é necessário ou não interferir no processo através de um atuador. Algumas das vantagens da inspeção automatizada são a sua alta velocidade e a possibilidade de inspeção de 100% do produto, favorecendo à melhoria da qualidade do produto e à economia de matéria prima, energia, etc /3/.

A inspeção do diâmetro pode fazer parte de um processo em malha fechada, no caso de controle de processo, ou simplesmente pode ter a função de monitoração em malha aberta. Para se monitorar as variações do diâmetro na saída da fieira, um sistema de medição de diâmetros automático deve ser aplicado.

Trabalhos de pesquisa aplicados ao desenvolvimento de um sistema de medição de diâmetros de fios finos /5/, /34/, /36/, /37/ têm sido realizados buscando-se atender aos requisitos impostos pelo processo de extrusão hidrostática-trefilação. Os principais requisitos são:

- alta velocidade de medição; o sistema de medição deve ser capaz de medir fios cuja velocidade é de até 50 m/s,
- capacidade de medição de fios com vibrações mecânicas na saída da fieira,
- robusto para ambiente de medição hostil com vapores e respingos de fluido lubrificante,
- típica faixa de medição de diâmetros de 10 a 500 μm /5/,/6/,
- incerteza de medição máxima permitida ao sistema de 0.5% do valor medido.

Outros requisitos relacionados com a adequabilidade do sistema de medição sugerem que:

- o sistema de medição deva ser leve, compacto e fácil de ser adaptado ao processo,
- livre de manutenção,
- fácil de ser calibrado.

2.2 Medição de pequenos diâmetros em processo

Os requisitos descritos no item 2.1.2 são difíceis de serem atendidos e é esse um dos motivos de ainda não se ter disponível no mercado sensores que atendam a todos os pontos relacionados no item anterior. No entanto, com o desenvolvimento de novas tecnologias, uma série de trabalhos e novos métodos de medição têm sido apresentados na tentativa de se atender às necessidades técnicas da indústria de fios e cabos.

A medição de pequenos diâmetros em processo basicamente é realizada por dois diferentes métodos. São eles, o método da pesagem, já discutido anteriormente onde o fio é medido fora do processo, e os métodos ópticos/6/.

Os métodos que se utilizam de princípios ópticos são os que melhor se destacam quando são aplicados em inspeção e medição em processos. As técnicas ópticas são particularmente bem adaptadas à inspeção industrial em ambientes hostis por causa das seguintes características:

- natureza de não contato mecânico, permitindo o sensoreamento remoto,
- rápido tempo de resposta,
- facilidade de automatização da medição.

Os métodos ópticos trabalham com a luz que pode ser manipulada e direcionada com o uso de componentes de baixo custo como espelhos, prismas, lentes, fibras ópticas etc. Importantes características da luz como coerência, interferência, polarização, difração, etc, podem ser usadas para o desenvolvimento de sensores /3/,/8/.

A descoberta do laser e sua posterior evolução para o laser semi-condutor, juntamente com o desenvolvimento de novos fotodetetores e fibras ópticas, abriu o caminho para o desenvolvimento de sistemas de medição precisos, compactos, baratos, robustos, confiáveis e de longa vida /7/. Essas características são importantes para aplicação de sensores em ambiente industrial hostil.

Assim, os princípios ópticos parecem ser convenientes para o desenvolvimento de um sistema de medição de pequenos diâmetros de aplicação industrial, como também deve-se usar componentes ópticos modernos /8/ para, finalmente, poder-se atender aos requisitos gerais de aplicação já citados.

Os sistemas de medição ópticos modernos geralmente possuem elementos característicos comuns que desempenham funções específicas. Os componentes básicos são a fonte de luz, óptica de recebimento da luz, o elemento fotodetector, sistema de processamento e indicação. A figura 2.7 apresenta um diagrama de bloco geral de um sistema óptico moderno /8/, destacando-se suas principais funções realizadas dentro do sistema.

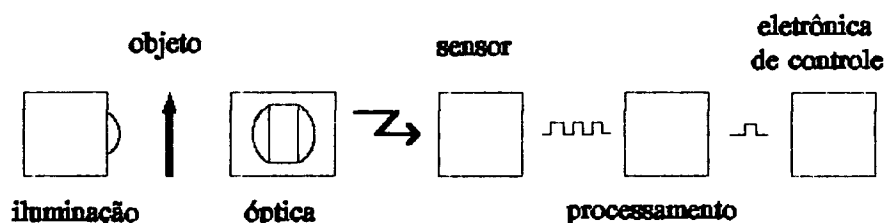


Figura 2.7 - Diagrama geral de um sistema óptico moderno

2.3 Métodos ópticos para medição de pequenos diâmetros

As fibras ópticas e os fios metálicos compõem em geral todo o universo de aplicação de sistemas de medição de pequenos diâmetros, pois é em relação a esses dois grupos que a indústria tem a necessidade técnica de controle de qualidade dimensional de seus diâmetros externos.

Em relação às fibras ópticas, outros parâmetros, como o diâmetro do núcleo, devem ser também medidos. As fibras são fabricadas com materiais translúcidos e em geral apresentam a estrutura mostrada na figura 2.8. O diâmetro externo é chamado de casca e o diâmetro interno é o núcleo.

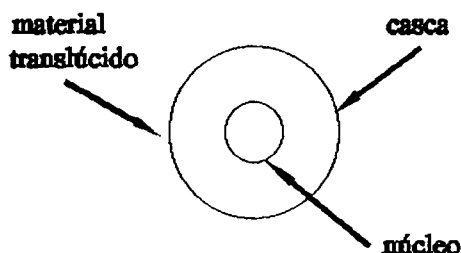


Figura 2.8 - Seção transversal de uma fibra óptica

É importante destacar que as diferenças de material e estrutura entre as fibras ópticas e os fios metálicos podem influenciar a escolha do método óptico mais adequado na medição de seus diâmetros. As diferenças das condições de medição, se em laboratório (medição estática e off-line) ou na indústria (medição dinâmica e on-line), também podem influenciar a escolha e aplicação de um método óptico de medição. As referências /12 a 16/ apresentam diferentes métodos ópticos aplicados na medição estática de diâmetros de fios e fibras ópticas em ambiente laboratorial.

Como já foi mencionado, este trabalho tem o interesse de estudar os métodos aplicáveis à medição de fios metálicos na indústria. Os métodos aplicados na medição de fibras ópticas em ambiente industriais são também discutidos aqui de modo a permitir a comparação entre diferentes métodos e se conhecer os seus limites.

Dois métodos ópticos se destacam na medição de pequenos diâmetros de fios metálicos e fibras ópticas na indústria. São eles o método da projeção de sombra e o método do espalhamento de luz. Tais métodos são discutidos nos itens a seguir.

2.3.1 Métodos da projeção de sombra

O princípio geral de funcionamento do método de projeção de sombra se baseia na medição da sombra causada pelo diâmetro quando colocado em uma região de luz colimada. Os feixes paralelos da luz colimada que incidem sobre o diâmetro produzem uma sombra bem definida sem a formação de penumbra. A medição da extensão da sombra está relacionada diretamente com a medição do diâmetro.

Existem variações desse princípio relacionadas com o tipo de fonte de luz usada, a forma de varredura dos feixes paralelos sobre o diâmetro e a forma de processamento de sinal para a definição das fronteiras e cálculo do diâmetro. Algumas dessas variações são brevemente discutidas abaixo.

a) Projeção incoerente

Neste método, o diâmetro é disposto em um campo de luz incoerente /9/. Somente os feixes paralelos são detectados por um fotodetector colocado após uma óptica coletora de luz e um diafragma. A interrupção parcial dos feixes paralelos provenientes do conjunto fonte de luz e lente colimadora produz a sombra cuja dimensão, medida pelo fotodetector array linear /9/, está diretamente relacionada com o diâmetro do fio. A figura 2.9 ilustra esse método. Se o fio for translúcido como as fibras ópticas, a região da sombra sofrerá a influência de outros feixes que atravessam o fio por refração, o que prejudica a medição do comprimento da sombra.

Cabe destacar que esse método é insensível ao movimento transversal e longitudinal do fio em relação ao feixe colimado, pois o tamanho da sombra permanece constante mesmo quando o fio tem esse movimentos e por isso essa configuração é também chamada por certos autores /9/ de "telecêntrica". Essa característica é importante para a medição de fios em vibração como é o caso da medição no processo (on-line) em ambiente industrial.

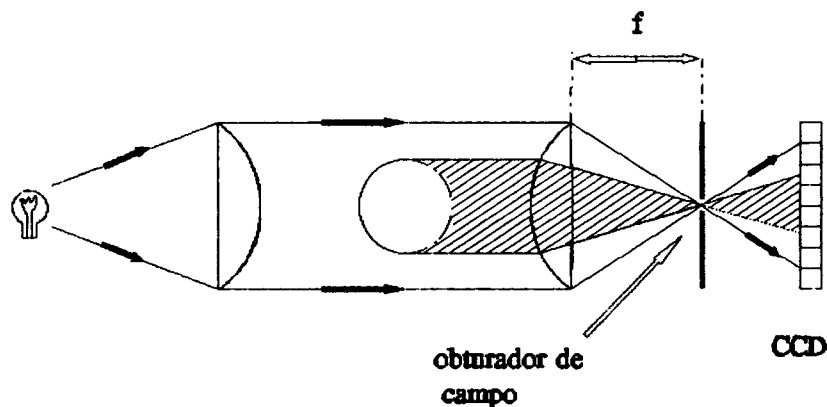


Figura 2.9 - Configuração "Telecêntrica" para monitoração do diâmetro - Iluminação não coerente.

b) Projeção coerente

Neste método, o fio é colocado em um campo de feixes de luz coerente colimado/17/. A sombra causada pelo fio é projetada sobre a superfície de um fotodetector array linear. Como a fonte de luz é espacialmente coerente, a região de sombra é modificada pela formação de um padrão de difração causada pelas bordas do fio.

O perfil de intensidade luminosa formada sobre a superfície do fotodetector é ilustrado na figura 2.10. A determinação do diâmetro do fio é feita pela identificação das suas bordas através de processamento do sinal da difração /17/. Algoritmos especiais devem ser usados para a compensação de erros causados pelo movimento transversal do fio no sentido de propagação dos feixes paralelos e para medição de fios translúcidos /26/.

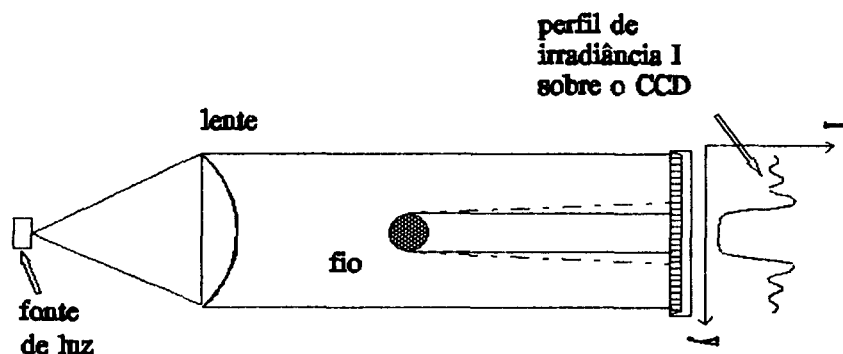


Figura 2.10 - Configuração de projeção coerente para a monitoração de diâmetro de fios.

c) Varredura de laser

O mais popular dos métodos ópticos para a medição de fios é o de varredura de laser. O método também se baseia na sombra causada por um fio exposto a um campo de feixes luminosos paralelos. Nesse método um feixe colimado de laser é varrido sobre o fio através do uso de um espelho em movimento rotativo ou oscilante. Conhecendo-se o movimento do feixe laser na região de medição e medindo-se o tempo no qual o feixe fica obstruído pelo fio, é possível se medir o diâmetro.

A figura 2.11 mostra um esquema do método /9/. Diferentes técnicas podem ser utilizadas para a determinação das bordas do fio. A figura mostra uma das técnicas onde a borda é determinada pela comparação entre o perfil de intensidade detectado pelo fotodetector na região de transição claro/escuro e um valor médio pré-estabelecido. Fica evidente que a medição do diâmetro é feita de forma indireta através da medição de tempo. Os movimentos transversais do fio pouco interferem na medição, pois a definição das bordas é independente desses movimentos se o feixe de laser for colimado, o que significa dizer que a sombra causada pelo fio em movimento não se altera.

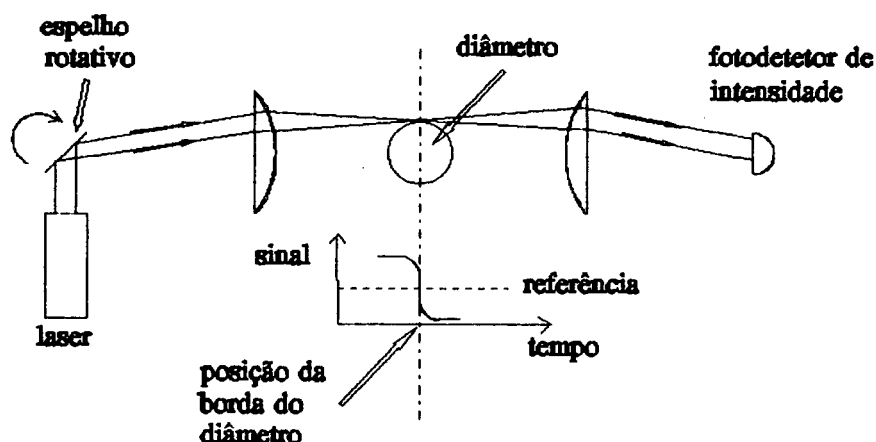


Figura 2.11 – Configuração "Telecêntrica" para a monitoração de diâmetros de fios – Varredura por laser.

Fios translúcidos podem ser medidos por esse método através de um processamento adicional de sinal comumente chamado de "lógica de vidro" /3/,/9/. Quando o feixe de laser incide sobre o fio de material translúcido, parte do feixe é refletida e parte é refratada. A parcela da refração que atinge o fotodetector prejudica a definição da região de sombra onde se determina as bordas do fio. O sinal do fotodetector nesta região pode ser processado de maneira a eliminar a influência da parte refratada do feixe laser o que permite a melhor definição das fronteiras da sombra.

Inúmeros instrumentos comerciais atualmente disponíveis no mercado se baseiam no método de varredura a laser e alguns deles apresentam pequenas variações no princípio de funcionamento /18/, /19/, /26 a 31/.

2.3.2 Métodos do espalhamento de luz (scattering techniques)

Os métodos de espalhamento de luz usados na medição de pequenos diâmetros se baseiam no processamento do sinal óptico do espalhamento da luz gerado quando o diâmetro é colocado em um campo de luz coerente /9/.

Dependendo da relação dimensional entre o comprimento de onda da luz e o tamanho do diâmetro, o fenômeno do espalhamento pode ser estudado separadamente em três partes: a reflexão, a refração e a difração /9/.

O padrão do sinal óptico produzido pelo espalhamento é produto da superposição dos três fenômenos e, se a luz é coerente, tem-se a interferência dos diversos feixes desviados de sua trajetória inicial provocados pela refração, reflexão e difração. As franjas geradas pela interferência dos diversos feixes guardam informações sobre o diâmetro do fio ou fibra óptica. Os métodos discutidos abaixo se baseiam no tratamento dessas franjas que, dependendo do tipo de material e do ângulo de observação, possuem formas diferentes.

Os métodos de espalhamento podem ser divididos em três técnicas diferentes: retroespalhamento (backscattering), espalhamento à frente (forwardscattering) e difração que, apesar de ser um caso especial do espalhamento à frente, é geralmente considerada uma técnica distinta das demais. Esses métodos são discutidos abaixo:

a) Retroespalhamento (backscattering)

O método é específico para medição de fios translúcidos (material dielétrico) como é o caso das fibras ópticas. Como o próprio nome indica, esse método trabalha com o campo de luz espalhada que está próximo a 180° em relação ao sentido de propagação do feixe incidente. Este feixe é de laser com comprimento de onda regulável. Esse método se baseia na monitoração das franjas causadas pela interferência entre feixes refletidos na parte trazeira e dianteira de uma fibra e também entre feixes refletidos na superfície da fibra (fig. 2.12). A interferência originada entre os feixes refletidos externamente e os refletidos mutuamente na parte interna da fibra é chamada de ressonância Fabry-Perot /20/.

Medindo-se o comprimento de onda que gera a máxima intensidade de ressonância e conhecendo-se o índice de refração do material da fibra é possível determinar o seu diâmetro /21/. Características como a forma do núcleo e o número de camadas da fibra, casca, influenciam esse método de medição /22/.

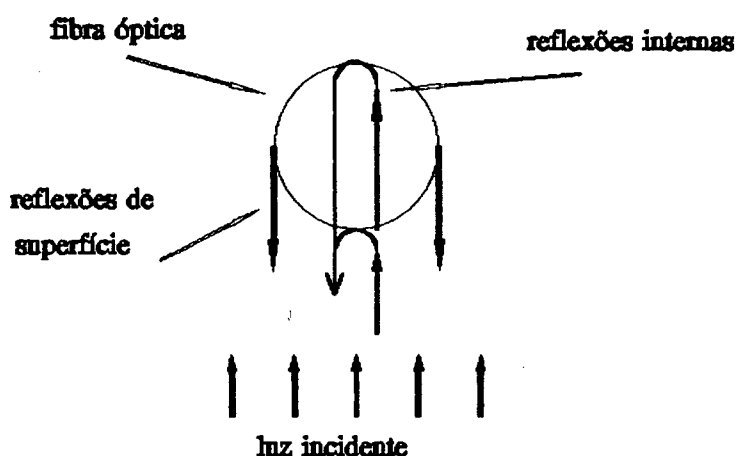


Figura 2.12 - Seção transversal de uma fibra mostrando o retroespalhamento originado pelas reflexões internas e de superfície.

b) Espalhamento à frente (forwardscattering)

Este método também é aplicado para medição de fios de material dielétrico. A fibra é exposta a um campo colimado de laser. Os feixes de luz que são refletidos na superfície externa da fibra interferem com os feixes refratados através dela, como também com as múltiplas reflexões na superfície do núcleo, para formar um padrão do espalhamento do laser. As franjas de interferência possuem informações sobre o diâmetro e podem ser detectadas por um fotodetector linear e processadas. As franjas são adquiridas à frente da fibra em ângulo de no máximo 90° /9/, /23/, /24/ e /25/. A figura 2.13 apresenta uma configuração típica do método discutido acima.

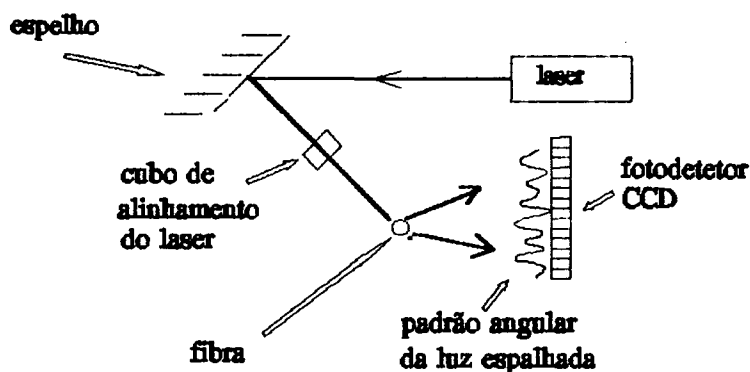


Figura 2.13 - Configuração simple do método do espalhamento à frente para a medição de diâmetros.

c) Difração

O método da difração usado na medição de pequenos diâmetros geralmente é aplicado para a medição de fios metálicos. Tais fios são opacos à luz. Como já foi mencionado, quando o fio é exposto a um campo de luz coerente colimado, uma parcela do feixe de luz é desviada de sua trajetória linear devido ao fenômeno da difração ocasionada na borda do fio. Tais desvios, somente detectados em ângulos muito pequenos em relação ao feixe colimado, não são oriundos nem da reflexão e nem da refração e sim da difração nas duas bordas do fio.

A interferência dos feixes difratados pode ser observada em um plano bem afastado do fio. O padrão de difração observado nessa condição é denominado de difração de Fraunhofer e sua modelação matemática é bastante simples /32/. Uma lente positiva pode ser usada para a observação da difração de Fraunhofer em uma região próxima ao fio chamada de Fresnel /32/, /33/. A figura 2.14 apresenta uma configuração típica do método de difração com lente.

O padrão de difração é formado no plano focal da lente e a distribuição espacial das franjas de interferência está diretamente relacionado com o diâmetro do fio. Um fotodetector array linear é usado para a aquisição do sinal óptico. Diferentes métodos são utilizados para se extrair a informação do diâmetro das franjas de interferência /32/ a /36/. Algumas variações deste método também são utilizadas na medição de pequenos diâmetros /37/, /38/.

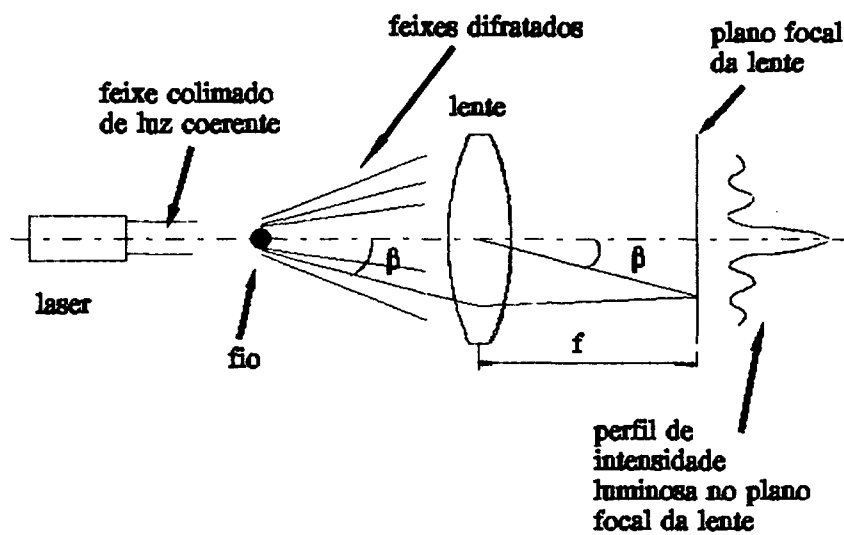


Figura 2.14 - Método da difração com lente

2.3.3 Comparação entre métodos

Os diferentes métodos de medição de pequenos diâmetros em ambiente industrial acima discutidos apresentam diferentes características metrológicas e de aplicação que devem ser comparadas para melhor conhecimento das vantagens, desvantagens, aplicabilidade e limites de cada um dos métodos.

Considerando-se que os métodos relacionados têm a característica comum de aplicação na medição de diâmetros em ambiente industrial, outros parâmetros são utilizados para a comparação entre os mesmos. Os parâmetros comparativos são:

- tipo de material : fibras ópticas ou fios metálicos
- tipo de medição : absoluta ou relativa
- faixa de operação
- incerteza de medição
- velocidade de medição

A figura 2.15 apresenta um quadro comparativo dos métodos ópticos na medição de diâmetros em ambiente industrial.

O quadro comparativo apresentado na figura 2.15 mostra que os vários métodos possuem características diferentes que podem ser adequadas em diferentes condições de aplicação, para fibras ópticas e fios metálicos.

Apesar de proporcionar uma alta taxa de leitura, os métodos de projeção coerente e incoerente não são adequados à medição de diâmetros pequenos, ou seja, menores que 500 μm e ainda apresentam uma incerteza de medição alta.

Os métodos de retroespalhamento e espalhamento à frente não são adequados à medição de fios metálicos, principal interesse desse trabalho. Para o caso de medição de fibras ópticas, esses métodos são bastante atrativos pois as suas incertezas de medição são pequenas. A velocidade de medição no método do espalhamento à frente é alta (1000 Hz) o que permite que se desenvolva sensores de monitoração de fibras ópticas no processo. Essa alta velocidade de medição é para o caso de medição relativa (medição de variações de diâmetro) /23/.

Os métodos que mais se adequam à medição de pequenos diâmetros de fios metálicos na indústria são o de varredura laser e o de difração de Fraunhofer. A grande maioria de sistemas ópticos de medição de diâmetros na indústria, comercialmente disponíveis, utiliza o método da varredura de laser. Esses medidores vêm sendo aperfeiçoado com o desenvolvimento de novos componentes e são comercialmente conhecidos como micrômetros a laser.

VALORES TÍPICOS

FIBRAS ÓPTICAS

FIOS METÁLICOS

	Faixa ^A	Incerteza	Taxa de Leitura ^c		Faixa ^A	Incerteza	Velocidade ^c
Varredura de laser	> 80 μm	- ^B	300 Hz		> 80 μm	$\pm 1.0 \mu\text{m}$	300 Hz
Projeção coerente*	> 1 mm	- ^B	1000 Hz		> 1 mm	$\pm 4 \mu\text{m}$	1000 Hz
Retro- espalhamento	15-100 μm	< $\pm 0.1\mu\text{m}$	- ^B		#	#	#
Espalhamento à frente	50-50 μm	$\pm 0.25\mu\text{m}$	1000 Hz ^B		#	#	#
Difração de Fraunhofer	#	#	#		10-500 μm	0.5-1% ^F	10 Hz

^A Faixa de medição de diâmetro.

^B Valores de incerteza não disponíveis em catálogos /26/ a /31/.

^c Velocidade de medição dada em frequência (taxa de leitura).

^D Valor de velocidade de medição não disponível (medição relativa) /22/.

^E Valor para medição relativa (medição de variações de diâmetro).

^F Erro percentual em relação ao valor medido.

* Método de projeção incoerente apresenta os mesmos valores típicos.

Método não se aplica ao tipo de diâmetro (fio ou fibra).

Figura 2.15 Quadro comparativo dos métodos ópticos para medição de diâmetros na indústria.

Nenhum sistema que utiliza o método da difração já alcançou o destaque comercial. Os trabalhos realizados sobre estes sistemas estão ainda na fase de pesquisa e desenvolvimento e as informações disponíveis sobre esse método se encontram em publicações técnico-científicas.

A figura 2.16 apresenta características metrológicas de alguns dos mais recentes micrômetros a laser disponíveis no mercado. Alguns fabricantes /29/, /30/ desenvolveram modelos especializados na medição de fios finos abaixo de 50 μm .

Os micrômetros a laser, apesar de já estarem consagrados como a solução para o controle dimensional automático no processo de fabricação de fios e cabos, não apresentam as características metrológicas ideais para a medição de fios com diâmetros menores que 50 μm pois, para o micrômetro com menor incerteza de medição (fig. 2.16), o erro para um fio de 50 μm seria de 0.4%, que está quase no limite permitido (erro máximo permitido de 0.5%, item 2.1.2), e para um fio de 20 μm o erro seria de 1%. Além disso, para se obter essa incerteza, a taxa de leitura deverá ser muito reduzida /30/, o que prejudica o desempenho do sistema se se deseja a medição no processo (on-line).

Fabricante	Diâmetro Mínimo (μm)	Resolução (μm)	Incerteza ^A (μm)	Taxa de leitura (Hz) ^B
LaserMike	127	0.3	± 1.5	100
Keyence	80	0.1	± 2.0	400
Mitutoyo*	15	0.05	± 0.5	280
Zumbach*	10	0.1	± 0.2	200
Zygo	80	0.1	± 1.5	120

* Modelos especializados para medição de fios finos

^A Valores de catálogo de incerteza de medição para baixas taxas de leitura

^B Taxas máximas de leitura

Figura 2.16 – Quadro comparativo de alguns micrômetros a laser comerciais
(referências /27 a 31/)

2.4 Princípio de medição adotado

Considerando-se que o método de varredura de laser possui limitações quanto à medição de diâmetros menores que 50 μm , o método de difração passa a ser o método mais apropriado a essa aplicação, pois diâmetros de até 1 μm podem ser medidos por esse princípio /16/.

O fato de ainda não ter no mercado um instrumento que utilize esse princípio é um indício de que a tecnologia ainda não apresenta resultados satisfatórios para aplicação industrial. Algumas características desse método, como a baixa velocidade de medição e o alto custo dos seus componentes, retardaram o processo de desenvolvimento de um sensor industrial que utilize esse princípio.

O desenvolvimento de novos componentes ópticos e optoeletrônicos mais robustos, compactos, rápidos, eficientes e baratos tem motivado os estudos de pesquisa para aperfeiçoamento desse método /32/,/34/,/36/.

Este trabalho pretende ser uma contribuição ao aperfeiçoamento e aplicação do método da difração para medição de pequenos fios metálicos na indústria.

2.4.1 Estado da arte em medidores de diâmetro por difração

Os trabalhos realizados em medidores de diâmetro por difração podem ser divididos em 2 grupos:

- medidores para laboratório - princípio : difração de Fraunhofer sem lente /15/ e /16/.
- medidores para ambiente industrial - princípio : difração de Fraunhofer com lente /32 a 37/.

A figura 2.17 apresenta um diagrama esquemático de um medidor de fios finos em laboratório /15/. Neste sistema, o padrão de difração é projetado em um anteparo a 1 m de distância do fio. Uma máquina de Abbe e um fotodetector array linear são usados para a detecção dos pontos de mínimo e máximo das franjas de interferência. Medindo-se a distância entre os mínimos ou máximos das franjas, determina-se o diâmetro do fio através de um processamento adequado.

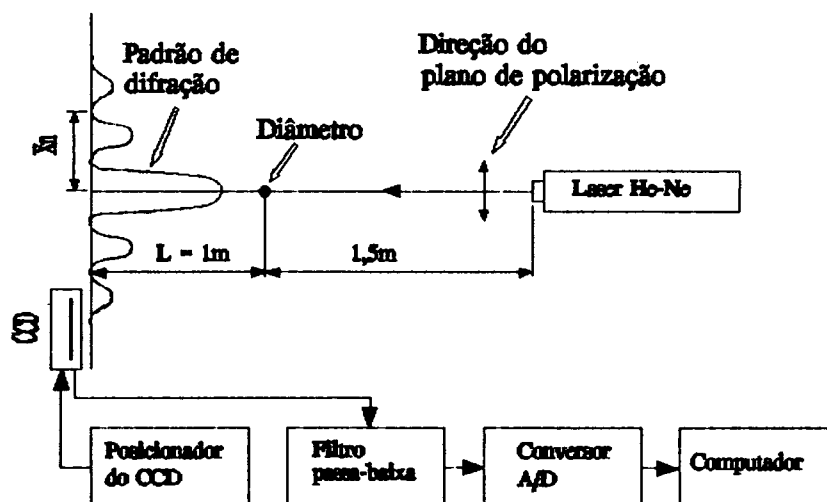


Figura 2.17 - Configuração para laboratório de um medidor de pequenos diâmetros por difração.

Os medidores por difração para ambiente industrial utilizam o princípio da difração de Fraunhofer observada na região de Fresnel, através do uso de uma lente positiva /32/, /43/. A figura 2.18 mostra o diagrama esquemático de um medidor de pequenos diâmetros por difração com lente. Um fio é colocado em um campo de luz coerente colimado. Uma lente positiva coleta a parcela da luz espalhada por difração nas bordas do fio, dessa forma o padrão de franjas da difração é projetado no plano focal da lente. Nesta posição encontra-se um fotodetector array linear que aquisição o sinal óptico transformando-o em sinal elétrico que é posteriormente processado. A distribuição espacial das franjas de interferência está diretamente relacionada com o diâmetro do fio.

A vantagem desse princípio está relacionada com a possibilidade de se ter o padrão de Fraunhofer, que é muito fácil de ser processado, requer pouco espaço, fazendo com que os medidores possam ser compactos. Outra vantagem é que o padrão de difração é independente de movimentos de translação do diâmetro em qualquer direção, significando que esse princípio pode ser utilizado na medição de fios com vibrações mecânicas /34/. Tais vibrações são típicas no processo de fabricação dos fios metálicos.

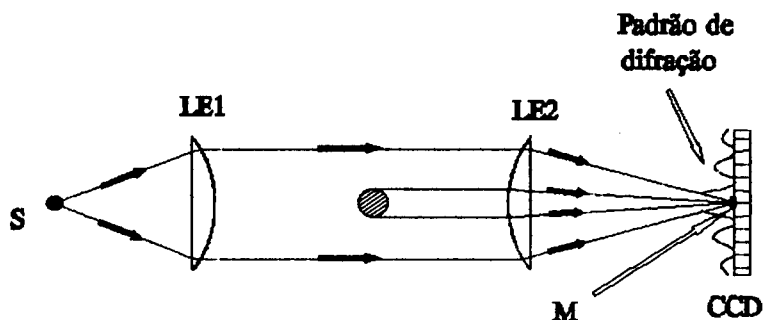


Figura 2.18 - Diagrama esquemático de um medidor de pequenos diâmetros por difração com lente. S: fonte de laser; LE1 e LE2: lentes esféricas; M: máscara; CCD: fotodetector.

A intensidade de energia do padrão de difração no plano focal da lente, também conhecido como padrão de Fraunhofer, possui a forma apresentada na figura 2.19 /43/.

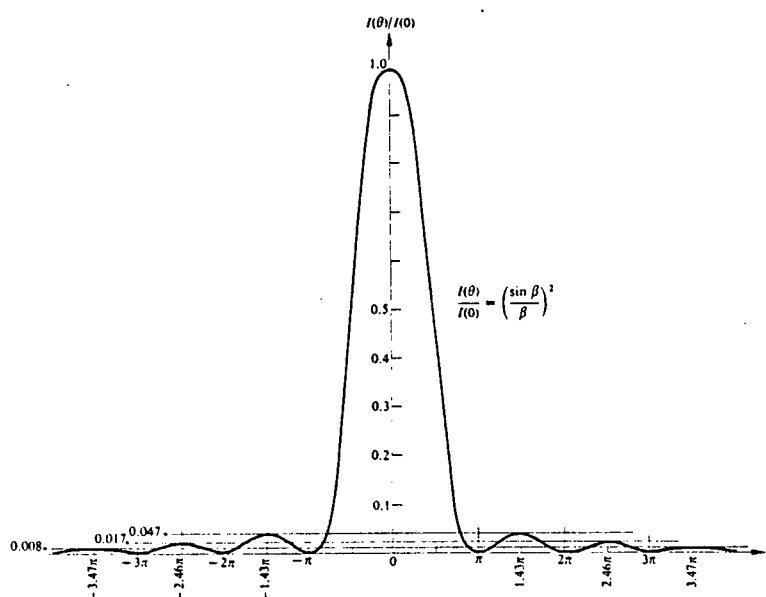


Figura 2.19 - Padrão de difração gerado por um pequeno diâmetro - Aproximação de Fraunhofer.

Os métodos de processamento das franjas de interferência podem também ser divididos em dois grupos:

- processamentos que trabalham com a freqüência espacial das franjas através da FFT (Transformada Rápida de Fourier) /32 a 35/
- processamentos que trabalham com a posição dos mínimos ou máximos das franjas /36/,/37/.

A figura 2.20 apresenta um quadro comparativo entre os principais tipos de medidores de diâmetro por difração. Os dados são apresentados segundo informações disponíveis nas publicações /32/ a /36/.

Medidores	Faixa - medição	Resolução	Incerteza	Taxa de leitura
Sistema de Laboratório	20 → 200 μm	0.01 μm	± 0.04 μm	baixa
Frequência Espacial	10 → 500 μm	- ^A	> 50μm ±0.2% < 50μm ±0.1μm	10 Hz
Posição de Franjas	20 → 200 μm	- ^A	± 0.5% ^B	- ^A

^A Informação não disponível
^B Erro percentual em relação ao valor medido

Figura 2.20 - Quadro comparativo entre os medidores por difração

As incertezas de medição dos sistema de laboratório são muito pequenas, como pode ser verificado na figura 2.20. A velocidade baixa de medição também é característica comum a esses sistemas. Os sistemas laboratoriais são usados para calibração de arames padrões muito finos. Suas características metrológicas representam os melhores resultados alcançados atualmente com o método da difração para medição de pequenos fios metálicos.

Os sistemas de medição de interesse para a medição em processo, diferenciados pela forma de processamento de frequência espacial e posição de franjas, apresentam limitações relacionadas com a velocidade de medição.

Os sistemas que processam a frequência espacial das franjas para se medir o diâmetro são lentos. O tempo gasto na medição da frequência espacial é grande pelo elevado número de pontos que devem ser processados utilizando-se os algoritmos de FFT /32/, /33/, /34/. Tais sistemas, apesar de suas incertezas de medição serem satisfatórias, ainda são limitados pela baixa taxa de leitura.

A configuração básica desse sistema (fig. 2.18) apresenta, como elemento detector de sinal óptico, um fotodetector array linear. Cada elemento (pixel) do fotodetector gera um sinal elétrico proporcional à intensidade luminosa média incidente sobre sua superfície e esse sinal é serialmente adquirido por um circuito eletrônico específico. Quanto maior o número de pixel do fotodetector array, maior o número de franjas adquiridas e, como consequência, maior o número de informações que deverão ser processadas.

O método de processamento das franjas através da medição da frequência espacial tem, como característica inerente, a necessidade de se processar várias franjas ao mesmo tempo para a diminuição dos erros de medição. Com isso, essa técnica forçosamente trabalha com um número maior de dados ao custo da diminuição da velocidade de medição.

Os sistemas que utilizam como técnica de processamento a medição da posição das franjas têm uma incerteza um pouco maior que os discutidos anteriormente, mas ainda dentro do limite permitido para medição de pequenos fio metálicos na indústria. Trabalhos recentemente publicados /33/, /36/, não apresentam valores máximos de taxa de leitura alcançados, mas discutem a vantagem desse método de processamento em termos do aumento da velocidade de medição do sistema com a diminuição do número de informações a serem processadas para se medir o diâmetro do fio.

As técnicas de medição da posição dos mínimos do padrão de difração são ainda motivo de estudo. O aumento da velocidade de medição dos medidores de diâmetros por difração, sem prejudicar o desempenho metrológico, é um dos objetivos que devem ser alcançados para a viabilização do desenvolvimento de um sensor para medição em processo.

2.4.2 Discussão geral sobre o projeto do sistema medição de pequenos fios metálicos

Os requisitos de inspeção de qualidade na produção de pequenos fios metálicos apresentados no item 2.2 e o estudo do estado da arte dos medidores de diâmetro por difração (item 2.4.1) estabelecem os requisitos técnicos que o projeto do medidor de diâmetro deve atender.

A figura 2.21 apresenta as metas que se pretende alcançar em termos de caracteristias metrológicas. Tais metas buscam atender às necessidades da indústria de fios e cabos considerando-se os limites do método da difração. Para diâmetros acima de 300 µm, os micrômetros a laser são mais adequados pois os erros de medição percentuais são baixos e também têm um custo pequeno. As metas de resolução, incerteza e velocidade de medição são função dos requisitos do processo de fabricação.

	Faixa de Medição	Resolução	Incerteza	Taxa de Leitura
Metas	10 ~ 300µm	0.05 %*	< 0.5 %*	> 300 Hz

* Porcentagem do valor medido

Figura 2.21 – Metas das características metrológicas do sistema pretendido

O sistema de medição desenvolvido neste trabalho utiliza o princípio de difração de Fraunhofer no campo de Fresnel, com lente, pois este princípio é considerado por este trabalho o mais adequado ao desenvolvimento de um medidor de pequenos diâmetros. Além disso, busca-se o aperfeiçoamento da técnica de medição de posição de franjas, como importante passo à melhoria dos medidores já existentes.

Como o interesse é no aperfeiçoamento da técnica de medição de pequenos diâmetros, um protótipo funcional é desenvolvido para o teste de diferentes configurações. É dado prioridade à especificação de componentes modernos disponíveis no mercado para a redução dos custos do protótipo e pela diminuição do tempo de desenvolvimento.

3. SISTEMA DE MEDIÇÃO PROPOSTO

Este capítulo apresenta o estudo teórico sobre o princípio da difração aplicado na medição de pequenos diâmetros de fios metálicos. A configuração do sistema de medição também é apresentada juntamente com o seu modelo matemático. Uma proposta de processamento de sinal é discutida como uma solução ao problema de medição de pequenos diâmetros com baixos erros e alta velocidade de medição. No último item desse capítulo, os módulos do sistema de medição proposto são apresentados.

3.1 Difração em pequenos diâmetros

O estudo teórico apresentado neste item é voltado especificamente ao fenômeno de difração causado nas bordas de um fio metálico de secção circular iluminado por uma fonte de luz coerente colimada.

O problema básico em questão é o estudo de propagação da luz quando um cilindro de material condutivo de comprimento infinito é colocado em um campo de frentes de ondas planas. Tais frentes de ondas caracterizam um feixe colimado de laser. A figura 3.1 ilustra o problema básico estudado.

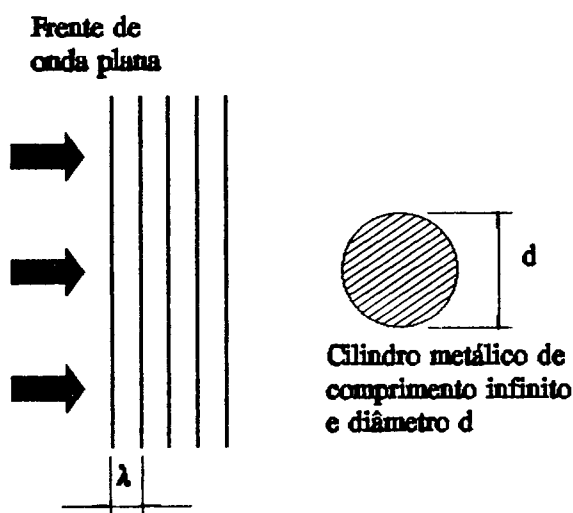


Figura 3.1 – Fio metálico em um campo de ondas planas

Existem vantagens na aplicação de frentes de ondas planas. O movimento de translação do cilindro em relação às frentes de onda planas não modifica a forma do padrão de difração observada na região de Fraunhofer /39/, /43/. Esta característica permite o desenvolvimento de um sistema de medição de fios imune a vibrações mecânicas, isto é, insensível aos movimentos do fio.

Outras vantagens do uso de frentes de ondas luminosa planas estão relacionadas com a simplicidade do modelamento matemático e facilidade de obtenção na prática através de um laser com óptica colimadora /43/.

As metas definidas no capítulo 2 estabelecem a faixa de medição de diâmetros de 10 a 300 μm como a de interesse na aplicação de um sistema de medição por difração. Dessa forma, o estudo da difração sobre um cilindro metálico, aqui apresentado, é voltado para essa faixa de diâmetro.

O estudo do perfil do padrão de interferência em um plano de observação distante, produzido pela difração nas bordas de um pequeno cilindro, permite a determinação do valor do diâmetro deste cilindro. Tal estudo é chamado de "estudo de problema inverso"/40/, onde uma característica de um sistema, ou elemento, é determinada a partir do conhecimento do seu espalhamento (scattering) obtido por um experimento ou observação.

3.1.1 Teorias envolvidas

Ao longo dos anos, desde o início do século XVIII, várias teorias sobre o fenômeno da difração foram desenvolvidas no sentido de se entender fisicamente e modelar matematicamente o fenômeno da interação da luz nas bordas de um objeto/40/. Diferentes concepções e aproximações foram utilizadas para o desenvolvimento dessas diferentes teorias. O histórico do estudo da difração ilustra os caminhos seguidos pelos físicos e matemáticos na busca do desenvolvimento da teoria das ondas de difração /40/ a /44/.

O entendimento geral das teorias desenvolvidas permite conhecer seus limites de aplicação, definidos pelas aproximações adotadas e características do modelo matemático. Nos dias atuais, um problema, que envolva o fenômeno da difração, pode ser estudado por teorias diferentes de acordo com as diferentes aproximações adotadas. Algumas dessas teorias são:

- solução pelas equações de Maxwell /44/,
- teoria escalar da difração /42/, /44/, /47/
- teoria vetorial da difração /47/,
- teoria das ondas de difração de borda /41/, /43/, /47/
- teoria geométrica da difração /48/, /49/

O estudo da difração causada por um cilindro metálico de comprimento infinito em um campo de frente de ondas planas, também pode ser feito utilizando-se uma dessas teorias. A escolha de uma delas, como a mais adequada a este estudo, é função dos requisitos e aproximações adotadas.

O mais simples e popular método matemático para o tratamento da difração é o de Kirchhoff, que tem base na solução da equação de Helmholtz definida pela Teoria Escalar da Difração /42/, /44/, /47/. Aproximações adicionais como a de Fresnel e de Fraunhofer também são utilizadas para facilitar a manipulação matemática do modelamento da difração partindo-se do método de Kirchhoff. Tais aproximações são bem descritas em várias referências /41/ a /47/. A aproximação de Fraunhofer, como já foi mencionado anteriormente, é utilizada no estudo do padrão de difração a uma distância infinita do fio ou no plano focal de uma lente positiva colocada entre o fio e o plano de observação do padrão de difração /46/.

Várias considerações devem ser observadas quanto ao uso de determinada aproximação no modelo matemático do problema da difração. As considerações principais, relacionadas com as aproximações usadas no estudo da difração em um cilindro metálico, são discutidas no item que se segue.

3.1.2 Aproximações no estudo da difração causada por um cilindro

O estudo da difração gerada por um cilindro metálico em um campo colimado de laser pode ser tremendamente simplificado dependendo da proporção entre o diâmetro do cilindro e o comprimento de onda do laser /44/.

Se o diâmetro do cilindro for maior que no mínimo vinte vezes o comprimento de onda, $d > 20\lambda$, o espalhamento da luz, causado pela perturbação do cilindro às frentes de onda eletromagnéticas planas, pode ser estudado como a combinação de três fenômenos: a reflexão, a refração e difração /44/, /45/. A figura 3.2 mostra os efeitos da refração, reflexão e difração sobre um cilindro citado acima.

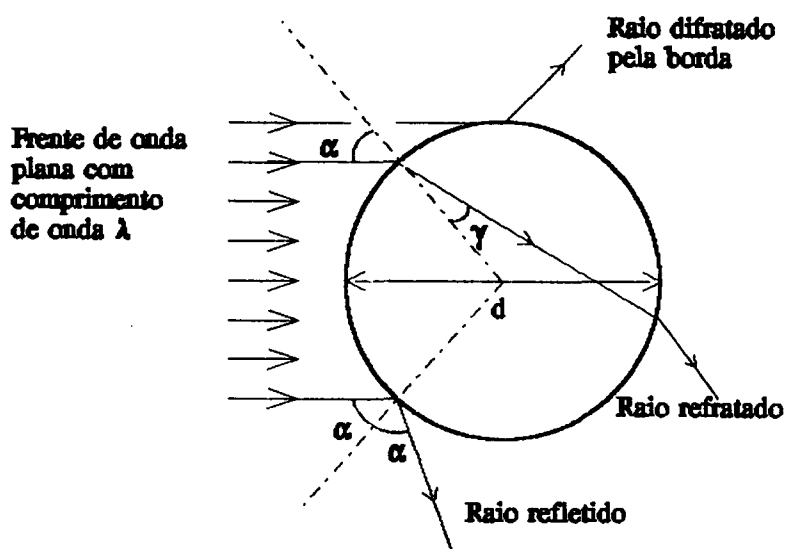


Figura 3.2 - Espalhamento da luz formado pelos fenômenos da reflexão, refração e difração para cilindros com $d \gg 20\mu\text{m}$.

Os efeitos da reflexão e refração podem ser estudados pela óptica geométrica através das leis de refração e reflexão /43/, /44/, /46/. Feixes de laser que atingem a superfície de um fio metálico com diâmetro de pelo menos vinte vezes o comprimento de onda serão desviados de suas trajetórias por reflexão ou difração. O espalhamento total da luz do laser pode ser estudado considerando-se a superposição desses dois fenômenos.

Os fios metálicos como ouro, tungstênio, aço inox, etc, são opacos à luz de laser, sendo assim, o fenômeno da refração não ocorre durante a exposição desses fios ao laser. Já no caso de fibras ópticas, a refração é uma componente importante, juntamente com a reflexão e difração, para o estudo do espalhamento da luz /23/.

Os efeitos da difração, para os casos de fios metálicos ($d \gg 20\lambda$) expostos a um campo colimado de laser, são observados a pequenos ângulos em relação à direção de propagação dos feixes de laser. Para esses casos, a participação da reflexão é mínima e o espalhamento do laser causado pelo fio pode ser estudado considerando-se somente o fenômeno da difração /44/.

Os modelos matemáticos da difração, como as aproximações de Fresnel e Fraunhofer permitem que o estudo da difração causada por um cilindro seja aproximado ao estudo da difração de uma fenda cuja abertura tenha as mesmas dimensões da sombra projetada do cilindro. Tal aproximação é oriunda do teorema de Babinet /43/, /50/. O estudo da difração gerada em uma fenda, exposta a uma frente de onda paralela com comprimento de onda muito pequeno, é discutido nas referências /43/, /50/, /51/. A figura 3.3 ilustra a aproximação adotada ao estudo da difração de um cilindro através do teorema de Babinet fazendo com que o modelo matemático seja simplificado.

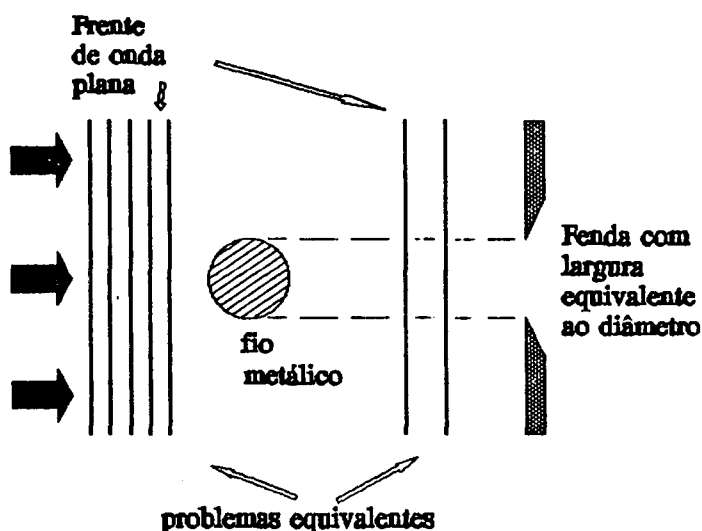


Figura 3.3 - Equivalência entre os problemas do cilindro e fenda colocados em um campo de ondas planas.

Através do uso de modelos matemáticos já desenvolvidos /51/, a obtenção do diâmetro a partir do estudo do padrão de difração é também simplificado. A seguir, a configuração proposta do medidor de pequenos diâmetros de fios metálicos é apresentada como também as equações matemáticas que modelam o sistema.

3.2 Configuração proposta

3.2.1 Descrição geral

A figura 3.4 apresenta as principais partes do sistema de medição de pequenos diâmetros na indústria. O diâmetro a ser medido é colocado em uma região de feixes paralelos de laser diodo e os feixes difratados são adquiridos por uma lente positiva. No plano focal dessa lente, um fotodetector linear discreto (vários pixels em linha) adquire o sinal do padrão de difração formado pela interferência entre os feixes difratados. O sinal de cada pixel do fotodetector é amplificado, digitalizado e processado a fim de se obter o diâmetro.

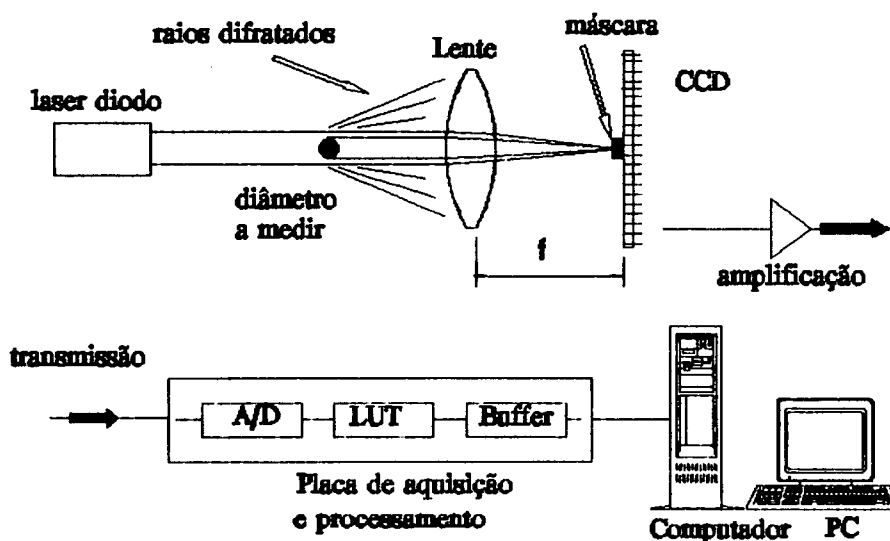


Figura 3.4 - Esquema geral do sistema de medição de pequenos diâmetros

A configuração adotada é semelhante à usada em recentes trabalhos /32/, /34/, /36/, onde o padrão de difração de Fraunhofer é observado no campo de Fresnel através do uso de uma lente positiva. A diferença básica entre a configuração apresentada neste trabalho e as demais está na forma de processamento de sinal para a obtenção do valor do diâmetro. A forma proposta de processamento é discutida em detalhe no item 3.4.

As vantagens dessa configuração estão relacionadas com o atendimento aos principais requisitos definidos no capítulo 2. Dentre elas cabe-se destacar:

- insensibilidade aos movimentos de translação do fio a ser medido,
- sistema compacto, leve e robusto,
- sistema sem partes mecânicas em movimento,
- confiabilidade e durabilidade,
- processamento de sinal descrito no item 3.4 permite o aumento de velocidade de medição sem prejudicar o comportamento metrológico do sistema.

As limitações desse sistema estão relacionadas com a sua sensibilidade aos movimentos angulares do fio que são discutidos no capítulo 4. Além disso impurezas no fio e/ou na lente podem causar perturbações no padrão de difração, o que pode ser contornado através do uso de ar comprimido para evitar que partículas em suspensão no ambiente industrial se acumulem sobre os componentes ópticos e no fio.

3.3 Formulação matemática da configuração adotada.

3.3.1 Modelamento matemático

Como já foi mencionado anteriormente, a difração gerada por um cilindro de comprimento infinito em um campo de feixe colimado de laser pode ser aproximada ao problema da difração de uma fenda infinita que pode ser modelado pela fórmula de Rayleigh-Sommerfeld, que é uma fórmula corrigida de Kirchhoff /51/, /52/.

Usando-se os modelos bidimensionais como os apresentados nas referências /46/ e /51/, a fenda é tratada como uma abertura de seção retangular. A figura 3.5 apresenta o esquema do problema da difração de uma fenda.

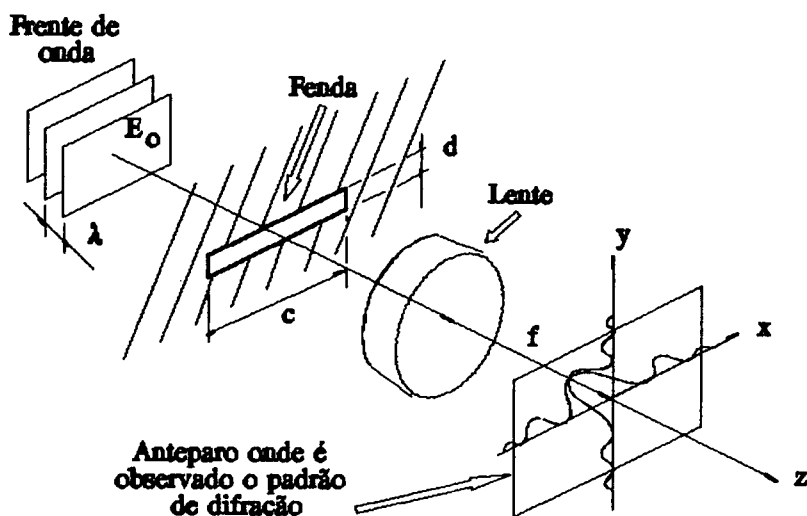


Figura 3.5 - Difração de Fraunhofer originada por uma fenda de seção retangular.

A irradiância, potência radiante por unidade de área, do padrão de difração de Fraunhofer, gerado por uma fenda de seção retangular e observado sobre um anteparo no foco de uma lente positiva, é dada pela equação 3.1 /51/

$$I(x, y) = \frac{|E_0|^2 \cdot (c \cdot d)^2}{\lambda^2 \cdot f^2} \cdot \text{sinc}^2\left(\frac{c \cdot x}{\lambda \cdot f}, \frac{d \cdot y}{\lambda \cdot f}\right) \quad (3.1)$$

onde E_0 é a amplitude do campo de onda plana que incide sobre a fenda, λ é o comprimento de onda, c é o comprimento da fenda, d é a abertura da fenda equivalente à sombra do diâmetro do fio medido e f é a distância focal da lente.

A função $\text{sinc}^1(x, y)$ é uma função bidimensional definida pela equação 3.2.

$$\text{sinc}^2(x, y) = \left(\frac{\text{sen}(\pi \cdot x)}{\pi \cdot x} \right)^2 \cdot \left(\frac{\text{sen}(\pi \cdot y)}{\pi \cdot y} \right)^2 \quad (3.2)$$

Algumas considerações devem ser observadas na aplicação da equação 3.1. A lente a ser usada deve ter abertura suficientemente grande para que suas bordas não influenciem no padrão de difração e as perdas de energia na lente são consideradas desprezíveis /51/. O ângulo máximo de observação do padrão de difração, correspondente à maior distância no plano focal a partir do eixo óptico da lente, deve obedecer limites definidos pela aproximação do modelo de Fraunhofer /51/ que aproxima as frentes de ondas difratadas cilíndricas em frentes com seção parabólica. Então, somente para ângulos muito pequenos, o modelo é válido.

Outra aproximação pode ser utilizada levando-se em conta a aplicação relacionada com este trabalho na medição de pequenos fios com comprimentos considerados infinitos. Como, em referência à figura 3.5, o comprimento c da fenda equivalente ao fio, é considerado infinito ($c \gg d$), o padrão de difração pode ser aproximado ao modelo unidimensional /46/ e a equação 3.1 pode ser modificada para a equação 3.3.

$$I(y) = \frac{|E_0|^2 \cdot (c \cdot d)^2}{\lambda^2 \cdot f^2} \cdot \left(\frac{\text{sen} \left(\pi \cdot \frac{d \cdot y}{\lambda \cdot f} \right)}{\pi \cdot \frac{d \cdot y}{\lambda \cdot f}} \right)^2 \quad (3.3)$$

A perfil de irradiância observado ao longo do eixo y no plano focal da lente é então descrito pela equação 3.3. Como E_0 é a amplitude do campo de frente de onda plana, o seu módulo ao quadrado representa a irradiância, ou seja, a potência por unidade de área. Para frente de onda plana, E_0 é uma constante.

Como a equação 3.1 foi aproximada para o modelo unidimensional (eq. 3.3), o parâmetro c agora é definido pelo largura da fenda equivalente ao comprimento de fio iluminado pelo feixe de laser. O comprimento d da fenda representa o diâmetro a ser medido. Considerações sobre o perfil Gaussiano dos feixes de laser devem ser observadas. Maiores detalhes são discutidos no item 3.3.3.

Modelos matemáticos simplificados da difração em fendas que não usam a formulação de Kircchoff já são bem conhecidos /33/, /43/, /52/. Tais modelos não impõem restrições sobre o ângulo máximo de observação do padrão de difração. A combinação das formulações simplificadas /52/ e a formulação apresentada na equação 3.3, que parte da formulação de Kircchoff, favorece à aplicação prática do estudo da difração, pois as restrições sobre o ângulo de observação são diminuídas. Tal aproximação também é usada em recentes trabalhos sobre medição de pequenos diâmetros /32/, /34/. A equação 3.3 combinada com o modelo descrito em /52/ gera a equação 3.4.

$$I(y) = \frac{|E_0|^2 \cdot (c \cdot d)^2}{\lambda^2 \cdot f^2} \cdot \left(\frac{\text{sen} \left(\pi \cdot \frac{d}{\lambda} \cdot \text{sen} \left(\arctan \left(\frac{y}{f} \right) \right) \right)}{\pi \cdot \frac{d}{\lambda} \cdot \text{sen} \left(\arctan \left(\frac{y}{f} \right) \right)} \right)^2 \quad (3.4)$$

A equação 3.4 ainda pode ser modificada para melhor aplicação prática no problema da medição de pequenos fios metálicos. Os próximos itens descrevem algumas outras considerações sobre o modelo matemático.

3.3.2 Correlação do perfil de irradiância do feixe com a potência do laser

A equação 3.4 considera que a frente de onda que incide sobre a fenda é plana, monocromática e que a sua irradiância é constante. Na situação real de aplicação de um feixe de laser diodo, o feixe colimado pode ser considerado uma frente de onda plana mas o perfil de irradiância não é constante. Um feixe de laser diodo colimado tem como seção transversal na forma de uma elipse. O perfil de irradiância nos eixos principais dessa elipse é aproximadamente da forma da curva de Gauss.

A potência total de um laser diodo está relacionada com a irradiância máxima no feixe e com as dimensões do mesmo nos eixos da elipse. A referência /51/ apresenta uma equação que relaciona potência e irradiância para um feixe gaussiano circular. A formulação apresentada pode ser manipulada para a aplicação de um feixe gaussiano elíptico, gerando a equação 3.5:

$$|E_0|^2_{\text{máx}} = \frac{P_{\text{total}} \cdot 2}{\pi \cdot w_1 \cdot w_2} \quad (3.5)$$

O termo à esquerda da equação, $|E_0|^2_{\text{máx}}$, é a irradiância máxima do feixe do laser diodo localizada no seu centro. P_{total} é a potência total do feixe geralmente expressa em miliwatts. Os termos w_1 e w_2 são os raios dos eixos principais da elipse apresentados na figura 3.6.

A figura 3.6 também apresenta a disposição favorável de aplicação do feixe de um laser diodo na medição de pequenos diâmetro. O eixo maior da elipse é colocado ortogonalmente ao eixo do fio a ser medido. Dessa forma certos níveis de vibração mecânica no fio são aceitáveis sem que este se mova para fora do feixe.

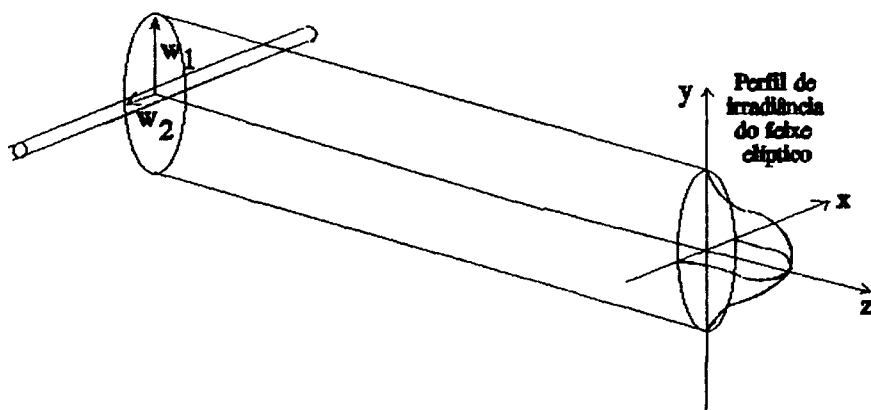


Figura 3.6 - Perfil de irradiância de um feixe colimado de um laser diodo incidente sobre um fio.

A fenda retangular equivalente ao fio a ser medido tem como dimensões o diâmetro e, na direção longitudinal ao fio, a espessura do feixe de laser dada por $2 \cdot w_1$. Como o diâmetro do fio é muito pequeno em relação a w_1 , o perfil de irradiância pode ser considerado constante ao longo da direção vertical do fio. Em relação ao eixo x, o perfil de irradiância é gaussiano mas o comprimento w_1 é geralmente quatro vezes menor que w_2 fazendo com que perfil gaussiano seja bem acentuado. Valores típicos de w_1 e w_2 para laser diodos comerciais são de 2 e 0.5 mm respectivamente.

Um valor médio de irradiância pode ser definido para se determinar a irradiância incidente sobre a fenda equivalente. Alterações nesse valor não alteram as posições das franjas do padrão de difração de Fraunhofer e sim apenas a magnitude dos pontos de máxima interferência construtiva. Como essa aproximação não é crítica na determinação das posições das franjas, a irradiância máxima do perfil gaussiano elíptico é utilizada nesse trabalho como a irradiância constante da frente de onda plana. A equação 3.6 considera o perfil de irradiância gaussiano elíptico de um feixe de laser diodo através da aplicação de equação 3.5 na equação 3.4.

$$I(y) = \frac{8 \cdot P_{total} \cdot w_2 \cdot d^2}{\pi \cdot w_1 \cdot \lambda^2 \cdot f^2} \cdot \left(\frac{\sin \left(\pi \cdot \frac{d}{\lambda} \cdot \sin \left(\arctan \left(\frac{y}{f} \right) \right) \right)}{\pi \cdot \frac{d}{\lambda} \cdot \sin \left(\arctan \left(\frac{y}{f} \right) \right)} \right)^2 \quad (3.6)$$

A equação 3.6 representa o perfil de irradiância do padrão de difração no plano focal de uma lente positiva. Através da medição da distância relativa entre as franjas formadas ou da medição de suas posições absolutas, é possível se determinar o valor de d (diâmetro do fio que gera o padrão definido pela equação 3.6). As formas de aquisição e processamento de sinal são discutidos em itens posteriores.

3.3.3 Correção de reflexão

A equação 3.6, por se tratar de um modelo de difração causado por uma fenda de espessura desprezível /46/, não considera os efeitos causados pela superfície curva do diâmetro a ser medido.

Feixes são desviados de sua trajetória devido às reflexões geradas na superfície do cilindro que se superpõem aos feixes gerados por difração na borda do cilindro. Por isso a equação 3.6 deve ser modificada para a correção da característica tridimensional do cilindro.

A teoria geométrica da difração /48/ estuda a difração em superfícies curvas e denomina os raios difratados como sendo "raios difratados de superfície". A teoria considera que esses raios são gerados ao longo da superfície do cilindro e não só na borda. A figura 3.7 apresenta um raio difratado contornando a superfície. Como foi dito, tal raio é chamado de raio difratado de superfície.

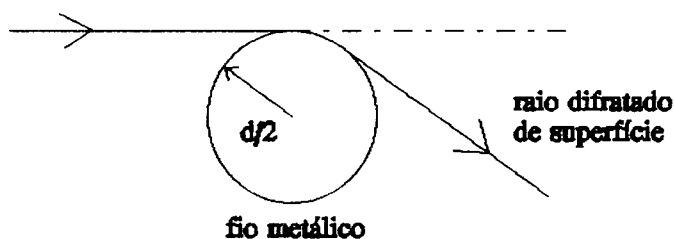


Figura 3.7 - Difração em uma superfície curva

A referência /49/ apresenta uma proposta de correção para a equação 3.6 para a diminuição dos erros devido aos efeitos do raio de curvatura do fio a ser medido. Segundo a referência /49/, a aplicação da equação sem correção dos efeitos da reflexão na medição de diâmetros proporciona um erro sistemático positivo, ou seja, o diâmetro medido será sempre maior do que o real.

A equação corrigida que considera a superfície curva do cilindro é apresentada no item 3.4.

3.3.4 Considerações finais sobre o modelo matemático

Alguns outros aspectos devem ser observados quanto ao modelo matemático usado neste trabalho.

Por se tratar de um modelo que parte da Teoria Escalar da Difração, a propriedade de polarização do laser não é considerada. Contudo, o uso de laser com polarização linear e com plano de polarização direcionado ortonormalmente ao fio metálico faz com que os resultados do modelo escalar se assemelhem aos resultados da Teoria Vetorial da Difração /47/. Por isso o uso de um laser polarizado linearmente, com o plano de polarização posicionado na direção perpendicular ao fio, é recomendado /15/.

O modelo usado também não considera as modificações no padrão de difração quando existem movimentos angulares entre o fio e o feixe de laser. A figura 3.8 apresenta a geometria do espalhamento da luz quando o fio é deslocado angularmente em relação aos raios de luz. Esse fenômeno é modelado pela Teoria Geométrica da Difração/48/. O padrão de difração observado em um plano passa a ter a forma circular pela intersecção do plano de observação e o cone dos feixes difratados.

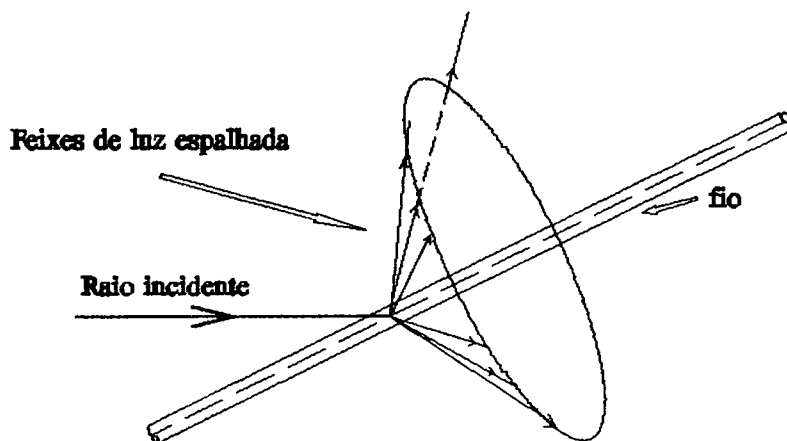


Figura 3.8 - Geometria do espalhamento de luz causado pela incidência oblíqua de um raio de luz sobre um fio metálico.

Como já mencionado, os diâmetros de interesse, $10\mu\text{m} < d < 300\mu\text{m}$, são considerados muito maiores do que o comprimento de onda do laser. Em tais situações os efeitos da difração são considerados localizados e portanto não dependem do material do fio /44/. O feixe de laser é considerado uma frente de onda plana e monocromático.

3.3.5 Aquisição de sinal pelo CCD

Como foi apresentado na figura 3.4, um fotodetector linear discreto CCD /3/, /9/ é usado para a aquisição do sinal de irradiância do padrão de difração no plano focal da lente.

Um fotodetector linear discreto é formado por uma série de fotodiodos em linha denominados de "pixeis". A resposta de cada pixel à iluminação do padrão de difração é função de sua geometria, da irradiância da luz incidente e do tempo no qual cada pixel é exposto à luz. A incidência de energia luminosa sobre o pixel gera um sinal elétrico que é armazenado e adquirido de forma serial depois de um tempo chamado de "tempo de integração"/3/, /9/.

A conversão de energia ocorrida no pixel, de irradiância do padrão de difração em sinal elétrico, depende da "sensibilidade do fotodetector"(anexo I).

A "exposição"(anexo I) excessiva do pixel à luz do laser pode provocar a sua saturação. A sensibilidade e a exposição máxima de saturação são características específicas de um fotodetector. Em geral, os fotodetectores CCD lineares têm como sinal de saída um sinal elétrico já convertido em tensão elétrica e os catálogos técnicos informam qual o sinal de tensão elétrica máxima gerada pelo pixel para uma exposição de saturação /53/. Então, conhecendo-se a irradiância incidente sobre a superfície do pixel e multiplicando-a pelo tempo de integração determina-se qual a tensão elétrica gerada em cada pixel segundo sua sensibilidade.

Na aplicação da detecção do padrão de difração gerado por um pequeno fio, a irradiância sobre o fotodetector CCD pode ser considerada constante sobre a área de cada pixel pois estes em geral têm dimensões muito pequenas. Em fotodetectores com grandes aberturas /53/, a distribuição de irradiância sobre a área do pixel deve ser considerada para a determinação do sinal de saída.

O perfil de irradiância do padrão de difração de Fraunhofer definido pela equação 3.6 pode ser expresso como perfil de sinal de tensão I_T gerado por cada pixel ao longo do fotodetector linear CCD (eq. 3.7), sendo y' a posição central de cada pixel em relação ao eixo óptico da lente. O parâmetro v é a tensão elétrica máxima gerada pelo pixel quando saturado, s é a exposição de saturação do pixel geralmente expressa em $\mu\text{j}/\text{mm}^2$, t é o tempo de integração e, por fim, R é a sensibilidade espectral que considera a variação da sensibilidade do pixel de acordo com o comprimento de onda da fonte de luz usada.

$$I_T(y') = \frac{v \cdot t \cdot R}{s} \cdot \frac{8 \cdot P_{\text{total}} \cdot w_2 \cdot d^2}{\pi \cdot w_1 \cdot \lambda^2 \cdot f^2} \cdot \left(\frac{\sin \left(\pi \cdot \frac{d}{\lambda} \cdot \sin \left(\arctan \left(\frac{y'}{f} \right) \right) \right)}{\pi \cdot \frac{d}{\lambda} \cdot \sin \left(\arctan \left(\frac{y'}{f} \right) \right)} \right)^2 \quad (3.7)$$

A configuração do medidor de pequenos diâmetros por difração adotada nesse trabalho apresenta uma máscara colocada sobre o fotodetector CCD na região central do padrão de difração. Busca-se evitar a saturação do sensor pela concentração nessa região dos feixes do laser não difratados. Com isso, há uma compressão da "faixa dinâmica" (anexo I) /34/, o que favorece à aquisição do padrão de interferência dos feixes difratados de menor irradiância. A figura 3.9 destaca a presença da máscara sobre o CCD eliminando a presença dos feixes não difratados.

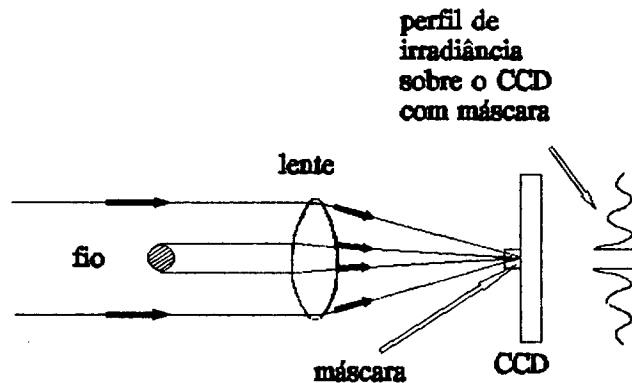


Figura 3.9 - Eliminação dos feixes não difratados através do uso de uma máscara sobre a superfície do CCD.

3.4 Processamento de sinal

O sinal de tensão gerado por cada pixel é amplificado e digitalizado para que um computador possa armazená-lo e processá-lo. Para se medir o diâmetro do fio são ainda necessários processamentos adicionais.

Como já foi mencionado, as distâncias entre os picos ou vales do padrão de difração, ou simplesmente as medições de suas posições absolutas, podem ser usadas para a medição do diâmetro. A equação 3.8 apresenta a relação matemática entre o diâmetro e as posições dos mínimos de irradiância do padrão de difração a partir da equação 3.6 quando $I(y)=0$ (mínima irradiância).

$$d = \frac{\lambda \cdot n}{\text{sen} \left(\arctan \left(\frac{y_n}{f} \right) \right)} \quad (3.8)$$

sendo $n=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$, denominado de ordem de franja, e y_n é a posição medida dos mínimos das franjas de ordem n .

Como foi mencionado no item 3.3.3, a equação 3.8 pode ser corrigida considerando-se os efeitos da reflexão. A referência /49/ propõe a equação 3.9 como a melhor aproximação matemática ao problema da influência da reflexão no padrão de difração originado por um fio metálico de pequeno diâmetro.

$$d = \frac{\lambda \cdot n}{\frac{1}{2} \cdot \left(\arctan \left(\frac{y_n}{f} \right) + 2 \cdot \text{sen} \left(\frac{\arctan \left(\frac{y_n}{f} \right)}{2} \right) \right)} \quad (3.9)$$

Para ângulos cada vez menores, a equação 3.9 tende assintoticamente para a equação 3.8, sendo assim, os efeitos da reflexão sobre o padrão de difração são menores para pequenos ângulos de observação da difração. Comparações entre as equações 3.8 e 3.9 são descritas na referência /49/.

Duas técnicas são conhecidas para a medição do diâmetro usando-se a equação 3.8 ou 3.9. São elas a medição da frequência espacial dos mínimos e a medição da posição dos mínimos. As características desses métodos já foram discutidas no item 2.4.1 do capítulo 2. Neste trabalho, a técnica da medição da posição dos mínimos é aperfeiçoada e utilizada.

Com base nas idéias propostas nas referências /23/ e /24/ que tratam do desenvolvimento de um medidor de fibras ópticas de aplicação industrial, um processo de medição pode ser dividido em duas modalidades: uma estática e outra dinâmica. A medição estática é a medição absoluta do diâmetro com menores erros e, como consequência por serem necessários mais dados, o processo é lento. A medição dinâmica é a medição relativa do diâmetro com uma incerteza um pouco maior mas extremamente rápida por envolver um número menor de dados e processamento mais simples.

A idéia mencionada acima é perfeitamente aplicável à medição de pequenos fios metálicos em processo porque, como foi discutido no capítulo 2, o processo de fabricação é semi-contínuo de forma que grande quantidade de um mesmo produto deve ser medido. Pode ser efetuada inicialmente uma medição estática (medição estática absoluta) e depois pode ser realizada apenas a monitoração das variações do diâmetro (medição dinâmica relativa).

As técnicas de processamento propostas neste trabalho visam o atendimento aos requisitos de incerteza e velocidade de medição discutidos no item 2.4.2. Os processamentos estáticos e dinâmicos são discutidos a seguir.

3.4.1 Processamento estático

Devido à presença da máscara no centro do fotodetector, como discutido no item 3.3.4, a medição da posição do mínimo de uma franja de ordem n é prejudicada por não se conhecer a posição central do padrão de difração e por não se observar o número de franjas incidentes sobre a máscara.

Duas franjas equidistantes do centro do padrão de difração podem ser medidas pelo CCD a partir da medição da posição de seus mínimos. A metade da distância medida entre essas franjas corresponde à posição absoluta de qualquer uma delas em relação ao centro do padrão de difração. Medindo-se a distância entre duas franjas adjacentes, a ordem das franjas, inicialmente medidas, pode ser determinada pela divisão entre a distância inicialmente medida e a distância entre franjas adjacentes. O inteiro mais próximo do resultado desta divisão corresponde à ordem da franja medida.

A figura 3.10 apresenta o esquema do processo estático de medição do diâmetro. Conhecendo-se o comprimento de onda e a distância focal, as equações 3.8 ou 3.9 podem ser aplicadas para se determinar o diâmetro do fio. A equação 3.8 pode ser expressa de outra forma mostrada na equação 3.10 para facilitar a sua implementação computacional.

$$d = n \cdot \lambda \cdot \sqrt{1 + \frac{f^2}{y_n^2}} \quad (3.10)$$

De acordo com a figura 3.10, y_n é a média das posições das franjas opostas (eq. 3.11) e n é a ordem da franja monitorada definida pelo número inteiro mais próximo do resultado da divisão definida pela equação 3.12.

$$y_n = \frac{y_{n1} + y_{n2}}{2} \quad (3.11)$$

$$n = \text{Inteiro} \left(\frac{y_n}{\Delta y_n} \right) \quad (3.12)$$

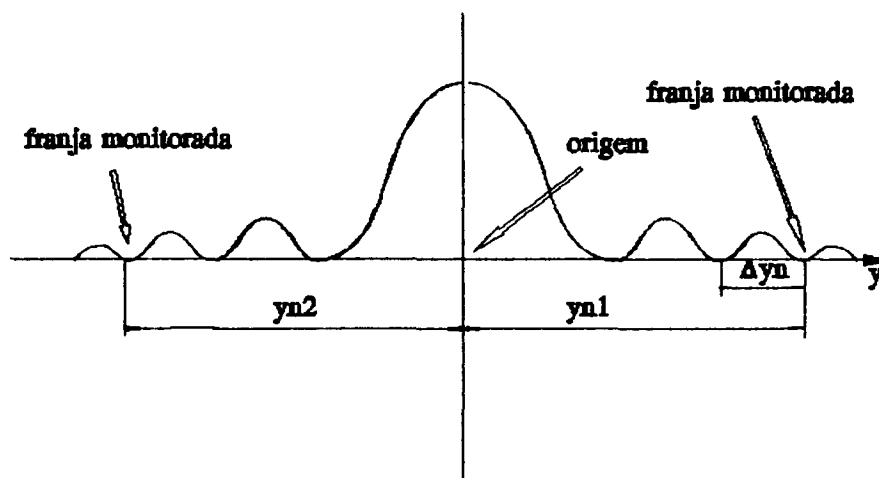


Figura 3.10 - Medição da posição dos mínimos das franjas do padrão de difração de Fraunhofer no processamento estático.

O sinal adquirido de cada pixel do CCD é digitalizado e portanto pode ser discretizado em níveis de cinza de 0 a 255 usando-se um conversor A/D de 8 bits. Métodos numéricos podem ser aplicados para se medir a posição do mínimo da franja de interferência. A referência /54/ apresenta um algoritmo simples de ajuste de curva por mínimos quadrados a sinais digitais. O vale de uma franja pode ser ajustado a uma parábola cujo ponto de mínimo é facilmente determinado.

3.4.2 Processamento dinâmico

Uma vez determinado o diâmetro pelo processamento estático, as variações relativas do diâmetro no processo de fabricação podem ser medidas através da monitoração da posição de apenas uma franja. Tal procedimento permite que o número de dados a serem processados seja reduzido, e sendo assim, o processo de medição pode ser acelerado.

Pequenas variações de diâmetro, devido a perturbações no processo de fabricação de fios metálicos finos, causam pequenas alterações na posição das franjas do padrão de difração. Quanto mais afastada a posição da franja em relação ao eixo óptico da lente, maior será sua sensibilidade às variações de diâmetro, ou seja, dada uma alteração no diâmetro, as franjas mais afastadas do centro do CCD sofrem deslocamentos maiores. A escolha da franja a ser monitorada depende das características geométricas do fotodetector, do processo de determinação da posição de mínimo intensidade da franja, das condições de vibração angulares do fio e das características metrológicas desejadas. Maiores detalhes são discutidos no item 4.1.3.

Após a medição do diâmetro pelo processo estático e definida a franja a ser monitorada, o processamento dinâmico é realizado para a medição das variações do diâmetro.

Tratando-se de medições de pequenas variações de diâmetro, as equações 3.8 e/ou 3.9 podem ser manipuladas de modo a simplificar as equações para o cálculo do diâmetro no processamento dinâmico. Partindo-se da manipulação da equação 3.8 e considerando que a variação da posição da franja não é maior que a distância entre duas franjas consecutivas medidas no processo estático, o valor do diâmetro pelo processamento dinâmico pode ser expresso segundo a equação 3.13.

$$d_D \approx d_E - \frac{k_1 \cdot \Delta y_n}{k_2 + m \cdot \Delta y_n} \quad (3.13)$$

onde,

$$k_1 = d_g \cdot m \quad (3.14)$$

$$k_2 = m \cdot \text{sen} \left(\arctan \left(\frac{y_n}{f} \right) \right) \quad (3.15)$$

$$m = \frac{\text{sen} \left(\arctan \left(\frac{y_n + F}{f} \right) \right) - \text{sen} \left(\arctan \left(\frac{y_n - F}{f} \right) \right)}{2 \cdot F} \quad (3.16)$$

O parâmetro d_s é o valor do diâmetro medido pelo processo estático, Δy , é a variação da posição do mínimo da franja medida no processo dinâmico e F é a máxima variação permitida da posição da franja monitorada definida pela equação aproximada 3.17. O valor de F define a máxima faixa de medição do processo dinâmico. Na figura 3.11 o valor de F está representado.

$$F \approx \frac{\lambda \cdot f}{2 \cdot d_s} \quad (3.17)$$

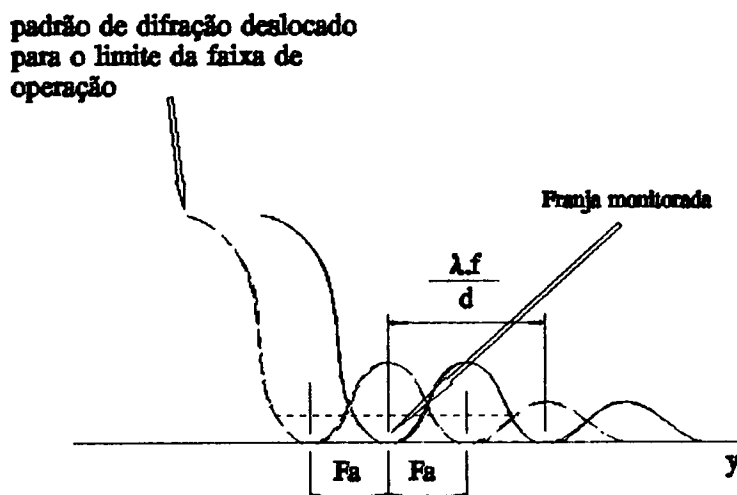


Figura 3.11 - Máxima variação admissível ($\pm F_a$) da posição da franja monitorada no processo de medição dinâmico.

Os erros introduzidos pelas aproximações adotadas no processo dinâmico são avaliados no capítulo 4. Simulações computacionais apresentadas no capítulo seguinte mostram que os erros introduzidos são desprezíveis quando as variações do valor do diâmetro também são pequenas. Os fios metálicos produzidos pelo processo hidrostático descrito no capítulo 2, apresentam em geral variações máximas de diâmetro na ordem de $\pm 5\%$ /1/. Este valor pode ser considerado como a faixa de medição no processo dinâmico. Dentro dessa faixa os erros introduzidos pelo uso das equações 3.13 e 3.17 são bastante reduzidos.

A equação 3.13 simplifica e acelera o processo de medição dinâmica pois os valores de d_1 , k_1 , k_2 e m são constantes, sendo assim apenas simples operações matemáticas devem ser realizadas para se conhecer as variações do diâmetro a partir da medição de Δy_1 .

3.5 Módulos do sistema

O sistema de medição proposto pode ser dividido em módulos para o melhor entendimento e definição de suas partes. Para o entendimento funcional do medidor de pequenos diâmetros a figura 3.12 é apresentada destacando-se os elementos funcionais do sistema de medição, assim como a caracterização dos módulos transdutor, unidade de tratamento de sinal e indicador. Os componentes apresentados na figura 3.12 são identificados pelo esquema geral apresentado na figura 3.4.

Dentro do módulo transdutor o feixe de laser colimado é considerado como o elemento sensor da grandeza a ser medida que é o diâmetro do fio metálico. O sinal de saída do elemento sensor é a difração ocorrida nas bordas do diâmetro. A lente funciona como um manipulador da difração para a obtenção do padrão de difração de Fraunhofer em seu plano focal. O fotodetector linear CCD, como último elemento do transdutor, faz a conversão do perfil do sinal luminoso do padrão de difração no perfil de sinal elétrico em forma de sinal de vídeo.

No módulo unidade de tratamento de sinal, o sinal de vídeo é amplificado e transmitido para uma placa de aquisição e processamento onde são realizadas as tarefas de conversão analógica/digital, armazenamento, processamento em tempo real para a determinação da posição dos mínimos das franjas e processamento matemático, via software, para a determinação do diâmetro.

Um computador é utilizado para o gerenciamento das atividades de aquisição e processamento em tempo real como também a execução das tarefas de processamento matemático por um software e indicação do valor do diâmetro para um observador externo.

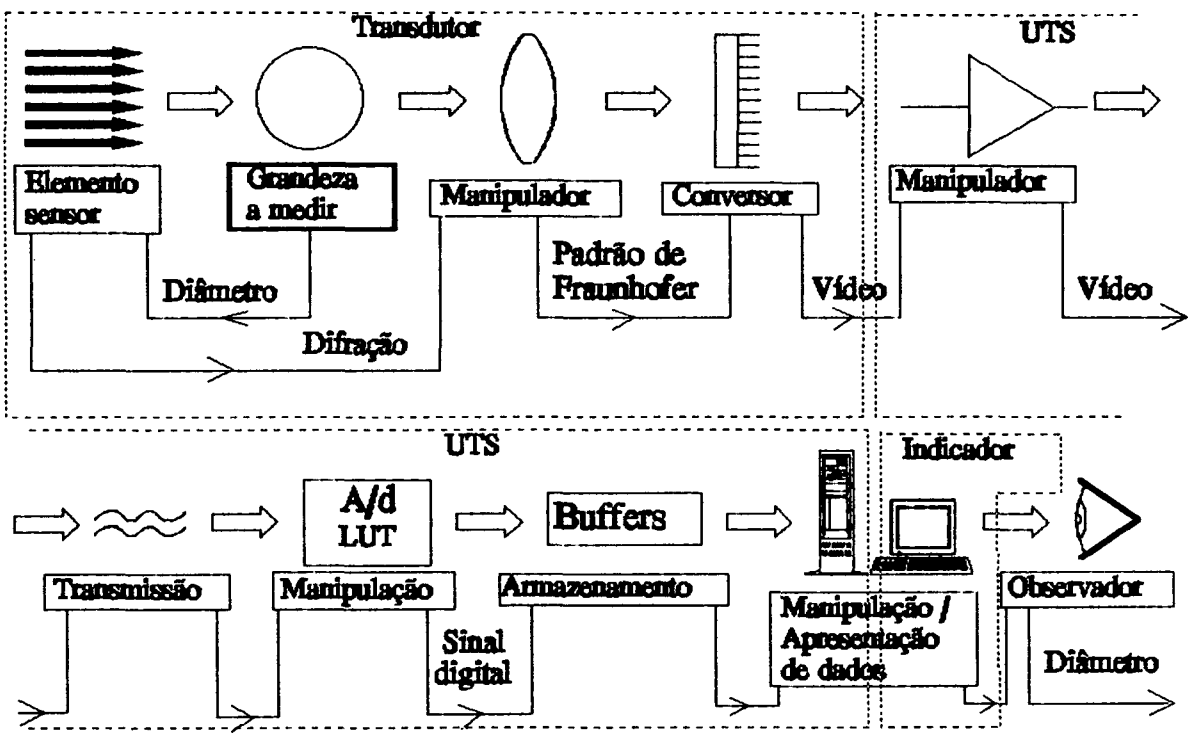


Figura 3.12 - Elementos funcionais do sistema de medição de pequenos diâmetros.

4. DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DE ERROS

Este capítulo apresenta o dimensionamento dos principais componentes do sistema de medição de diâmetro de pequenos fios metálicos. As principais fontes de erro também são discutidas.

4.1 Dimensionamento geral do sistema de medição proposto

Os requisitos metrológicos, apresentados como metas a serem alcançadas, foram discutidos no item 2.4.2. Tais metas são consideradas no dimensionamento dos principais componentes do sistema de medição de pequenos diâmetros.

O dimensionamento inicial baseia-se na resolução de medição desejada ao sistema. A resolução na medição do diâmetro é dependente de f , λ , resolução com que o sistema de medição detecta a variação da posição da franja sobre o CCD, nível de ruídos, ordem da franja adotada, do próprio d e do tipo de processamento (estático ou dinâmico). A equação 4.1, que parte da derivada parcial de d em relação a y , na equação 3.10, apresenta a relação entre a variação da posição da franja e a variação do diâmetro correspondente. O sinal negativo na equação 4.1 indica que, se há um aumento de diâmetro, a posição y , da franja diminui, isto é, aproxima-se do eixo óptico da lente.

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{-f^2 \cdot \Delta y_n}{(y_n^2 + f^2) \cdot y_n} \quad (4.1)$$

A faixa de medição do sistema no modo de processamento dinâmico, como já foi discutido no item 3.4.2, depende da distância entre as franjas que, por sua vez, depende da distância focal, do comprimento de onda e do diâmetro medido.

A incerteza de medição total do sistema é função de inúmeros parâmetros que são discutidos no item 4.3.

Os principais componentes a serem dimensionados são o laser, a lente e o sensor CCD juntamente com a placa digitalizadora. O dimensionamento e a especificação desses componentes definem as características metrológicas e operacionais principais do sistema de medição proposto nesse trabalho. É importante ressaltar que o dimensionamento e especificação são, neste caso, dependentes da disponibilidade comercial dos componentes. Os itens que se seguem apresentam o dimensionamento dos componentes citados.

4.1.1 Laser

Como já foi citado anteriormente no capítulo 2, o uso de um laser diodo apresenta diversas vantagens sobre o uso do laser a gás como o HeNe, pois o laser diodo é mais compacto, robusto, leve, tem maior confiabilidade e vida útil. Os recentes desenvolvimentos de laser diodo na faixa do laser visível permitem que estes sejam aplicados em um sistema de medição de pequenos diâmetros com a vantagem da facilidade de alinhamento em campo entre sensor e fio a ser medido, pois o feixe é visível.

Na medição do diâmetro pelo método da difração foi considerado idealmente que a frente de onda plana aplicada sobre o diâmetro era monocromática. Um feixe de laser diodo possui uma banda espectral composta por uma faixa de comprimento de onda. As franjas do padrão de difração de cada comprimento de onda têm posições diferentes sobre o CCD pois o valor de λ na equação 3.10 é diferente. A escolha do laser deve levar em conta o comprimento da banda de espectro, que deve ser reduzido e não perturbar a formação das franjas de interferência do padrão de difração. A figura 4.1 apresenta a influência dos diferentes comprimentos de onda presentes em um feixe de laser real.

Outras características como a potência, razão de polarização e dimensões do feixe também devem ser consideradas.

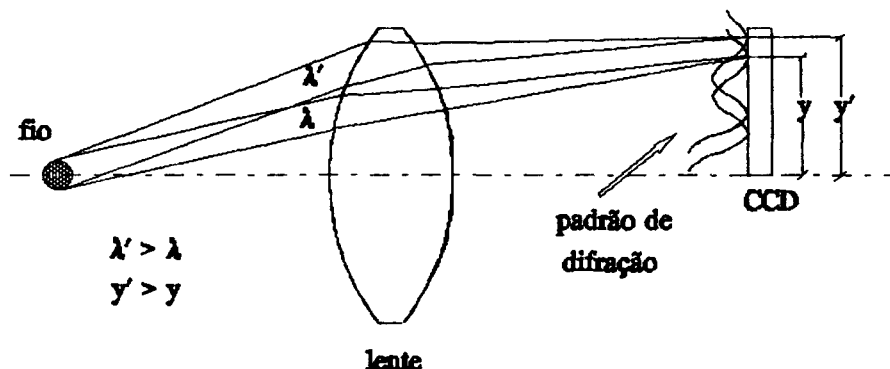


Figura 4.1 – Influência da variação do comprimento de onda λ do feixe de laser sobre a posição das franjas.

Como foi discutido no capítulo 3, o padrão de difração é adquirido pelo fotodetector linear CCD que possui uma série de elementos sensores em linha, os pixels. A resolução do sistema de medição do diâmetro depende do passo entre pixel, como é discutido posteriormente. Sobre a superfície do pixel, como foi mencionado no item 3.3.5, o perfil do padrão de difração é considerado constante. Para o dimensionamento da banda de espectro do laser, a variação da posição das franjas para os diferentes comprimentos de onda deverá ser mantida não superior a 1/20 do comprimento do pixel, para que não se perturbe o contraste das franjas de interferência. Partindo-se da equação 3.10, a equação 4.2 pode ser obtida relacionando a variação de y , causada pela largura de banda do espectro de λ do feixe de laser.

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{f^2 \cdot \Delta y_n}{\left(1 + \frac{f^2}{y_n^2}\right) \cdot y_n^3} \quad (4.2)$$

Fazendo com que $\Delta y_1 < p/20$, onde p é o passo entre pixel do CCD, tem-se

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} < \frac{f^2 \cdot \frac{p}{20}}{\left(1 + \frac{f^2}{y_n^2}\right) \cdot y_n^3} \quad (4.3)$$

Os laser diodos chamados de "single mode", modo temporal/espacial único /46/, possuem tipicamente a largura de banda do espectro do feixe na ordem de décimo de ângstron, ou seja, $\Delta \lambda < 0.01$ nm. Esse valor é suficiente para que não haja perturbação do padrão de difração e, sendo assim, o feixe pode ser considerado monocromático para valores típicos de f , p e y_1 que serão dimensionados posteriormente. Para o laser diodo visível disponível comercialmente, $\lambda = 0.670$ μm .

A potência total do feixe deve ser suficiente para a detecção dos feixes difratados. A razão de polarização linear deve ser máxima para a eliminação dos feixes de polarização aleatória que perturbam a formação do padrão de difração /5/. O valor máximo típico da razão de polarização para os laser diodos de luz visível disponíveis comercialmente é de 100:1.

As dimensões do feixe definem a chamada janela de medição onde o fio é colocado para ser medido. Tipicamente a secção transversal do feixe de laser diodo colimado apresenta a forma elíptica com a razão de aspecto de 4:1, ou seja, o eixo maior da elipse é 4 vezes maior que o eixo menor. A figura 4.2 apresenta a janela de medição onde certos níveis de vibração mecânica do fio são admissíveis no processo de medição.

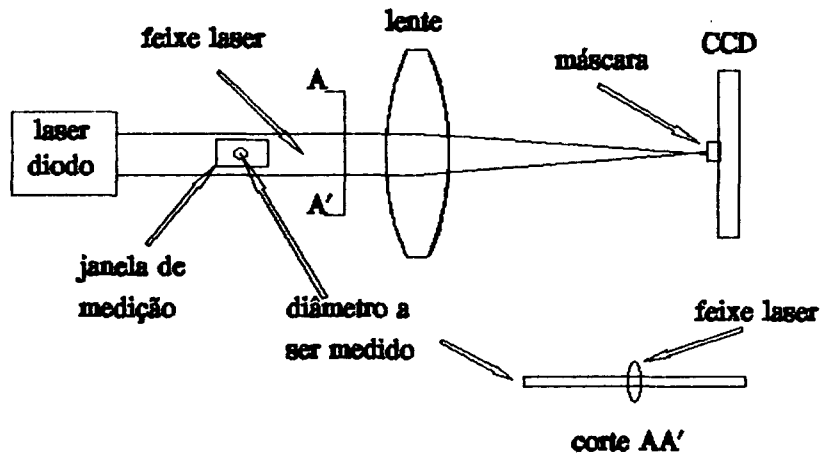


Figura 4.2 - Janela de medição

4.1.2 Lente

A lente, como já foi mencionado no capítulo 3, focaliza o padrão de difração de modo que o padrão de Fraunhofer pode ser observado no plano focal. Os parâmetros principais que definem a especificação da lente são a sua distância focal e a sua abertura, caracterizada pelo seu número F , razão entre o diâmetro da lente e o seu foco.

A abertura da lente deve ser suficiente para que suas bordas não interfiram no padrão de difração. A distância focal depende da relação existente entre o número de franjas formadas sobre o fotodetector CCD e o número de pixels que ele possui. O item 4.2 apresenta a simulação computacional do sistema de medição aqui proposto apresentando a influência de diferentes comprimentos focais

Um aspecto importante deve ser destacado em relação à lente. Quanto menor a distância focal da lente, para um mesmo comprimento de CCD, maior será o ângulo de observação do padrão de difração. Em ângulos maiores de observação, a reflexão na superfície do fio tem maior influência sobre o padrão de difração como foi discutido no capítulo 3. A figura 4.3 apresenta o padrão de difração observado no plano focal de lentes com focos diferentes.

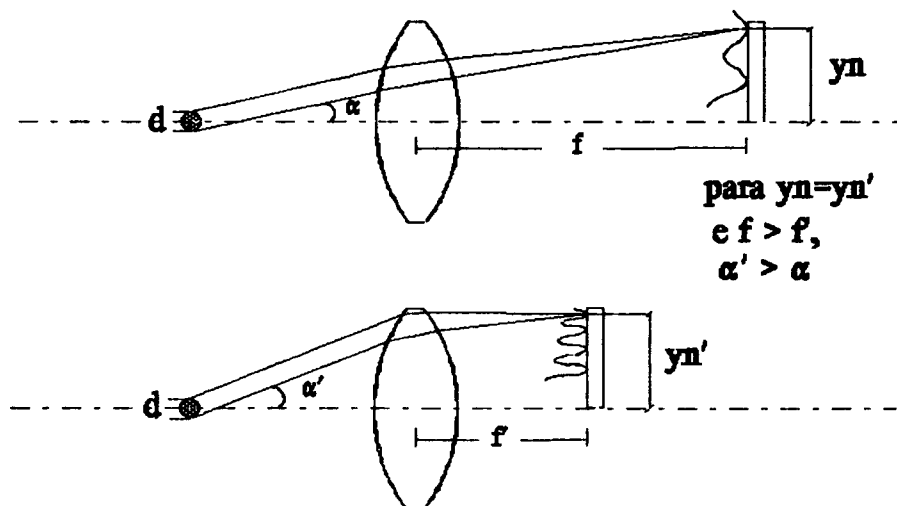


Figura 4.3 - Obtenção do padrão de difração para focos diferentes.

A especificação da melhor distância focal para aplicação no sistema de medição de pequenos diâmetros é função dos testes experimentais apresentados no capítulo 6. Portanto, uma série de diferentes lentes são testadas levando-se em conta a disponibilidade comercial e qualidade das lentes.

As lentes também devem estar livres de aberrações, o que na prática é impossível, mas valores reduzidos de aberrações podem ser encontradas em lentes comercialmente disponíveis a preços acessíveis. As lentes fotográficas se apresentam como uma ótima opção na aplicação no sistema de medição pela sua qualidade e preços reduzidos /3/.

Diferentes comprimentos focais são oferecidos em lentes fotográficas comerciais. Lentes com foco de 50, 85, 105 e 135 mm são facilmente obtidas no mercado com preços acessíveis e de boa qualidade. As lente de foco 85, 105 e 135 mm são chamadas de telefoto e a de 50 mm de lente normal. No capítulo 5 as lentes fotográficas utilizadas são melhor discutidas.

4.1.3 Sensor CCD

O dimensionamento do fotodetector CCD baseia-se principalmente na resolução estimada ao sistema de medição. A relação entre a variação do diâmetro e a variação da posição de uma franja no padrão de difração é apresentada na equação 4.1. Se a franja estiver localizada em uma posição mais afastada em relação ao eixo óptico da lente, maior será a sua variação de posição correspondente a uma variação do diâmetro. A resolução do sistema também depende do método aplicado para a medição do mínimo da franja.

Diferentes métodos de medição do mínimo da franja podem ser aplicados. Dois métodos são aplicados neste trabalho: interpolação de uma parábola no perfil de irradiância de uma vale de franja e o método da referência, onde o número de pixel abaixo de um certo valor de referência é contado e dividido por dois para se conhecer o centro do vale. No segundo método, uma referência é traçada em um vale e, assumindo-se a simetria da franja, a metade do número de pixel abaixo dessa referência corresponde ao centro desta. A figura 4.4 ilustra os dois métodos.

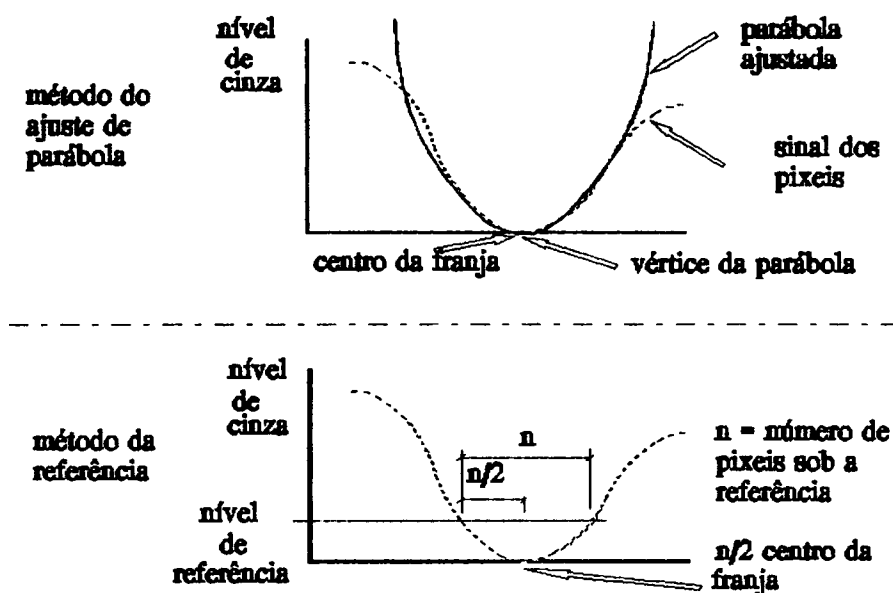


Figura 4.4 - Métodos de medição da posição da franja

No método de interpolação de uma parábola, a resolução na medição da posição da franja é melhor que no segundo método. Simulações computacionais demonstram que o segundo método apresenta a resolução de $p/2$. Considerando que $p/2$ é o menor valor de Δy , a ser detectado por um CCD de passo p , o comprimento mínimo y , pode ser calculado para que a resolução do sistema de medição de diâmetro seja próximo a 0.05%, valor definido no capítulo 2.

Fotodetetores modernos com passo típico de $13\mu\text{m}$ e com 2048 pixels são facilmente encontrados no mercado. Centrando-se esse fotodetector em relação ao eixo óptico da lente no seu plano focal, uma franja disposta a no mínimo 10 mm do centro do fotodetector pode ser medida. Para $y > 10$ mm a resolução para $\Delta y = p/2$ é menor que 0.06%, valor calculado pela equação 4.1. O comprimento total do CCD é de 26.624 mm. Então, $y > 10$ mm passa a ser uma condição necessária para a obtenção da resolução de no máximo 0.06% na medição de pequenos diâmetros.

As possíveis vibrações angulares do fio a ser medido fazem com que o padrão de difração acompanhe as vibrações, girando-se em torno do centro do fotodetector ou distorcendo-se na forma de um círculo como foi citado no item 3.3.4. Com isso, as franjas localizadas mais afastadas do centro do eixo da lente tendem a se mover para fora do CCD. A utilização de um fotodetector com abertura do pixel ampla ou o controle das vibrações angulares do fio são as soluções para esse problema. Fotodetetores rápidos e com baixos níveis de ruído elétrico possuem pequenas aberturas /53/. Espera-se no futuro próximo a disponibilidade no mercado de câmeras com sensores ópticos de grande abertura lateral dos pixel sem o prejuízo de seu desempenho e velocidade. Neste trabalho um fotodetector CCD com a abertura lateral do pixel de $26\mu\text{m}$ é utilizado. Com tal fotodetector, as vibrações angulares do fio a ser medido devem ser controladas para se evitar que o padrão de difração incida fora do pixel.

A faixa dinâmica (anexo I) do CCD também é um importante parâmetro a ser considerado. Quanto maior a faixa dinâmica melhor será a resolução na detecção do sinal de irradiância de cada pixel. Faixa dinâmica é definida com $V_{\text{SATURAÇÃO}} / \text{Ruido}$, ou seja, a razão entre a tensão de saturação de cada pixel e o ruído gerado. Tipicamente, a faixa dinâmica de um CCD é > 48 dB ($V_{\text{SATURAÇÃO}} > 251 \text{ Ruido}$). Dessa forma o sinal de tensão elétrica gerado em cada pixel pode ser digitalizado usando-se um conversor A/D de 8 bits.

Outros parâmetros como a sensibilidade e o tempo de integração definem a potência do laser a ser utilizada e também a taxa de varredura do CCD. A equação 3.7 apresentada no capítulo anterior define o sinal de saída de cada pixel levando-se também em conta a sensibilidade e o tempo de integração. Em relação à equação 3.7, um valor típico de exposição de saturação, para um pixel de $26\text{ }\mu\text{m}$ de abertura e passo de $13\text{ }\mu\text{m}$, é de $0.0022\text{ }\mu\text{J}/\text{mm}^2$. A essa exposição de saturação o sinal de tensão de saída é de 0.7 V /53/.

Fabricantes de fotodetetores geralmente oferecem circuitos eletrônicos que têm a função de evitar a saturação dos pixel que estão expostos a excesso de luz. Em câmeras industriais, onde o CCD já está integrado a circuitos de amplificação e tratamento de ruídos, existem circuitos chamados de "anti-blooming" cuja função é de drenar o excesso de carga elétrica gerado pelos pixels que foram excessivamente expostos à luz. Maiores detalhes são discutidos no capítulo 5.

4.2 Simulação computacional do sistema de medição de pequenos diâmetros

Utilizando-se a equação 3.7, e considerando-se o dimensionamento dos principais componentes apresentados até aqui nesse capítulo, o sistema de medição de pequenos fios metálicos proposto nesse trabalho pode ser simulado computacionalmente com os seguintes objetivos:

- conhecer o comportamento geral do sistema de medição,
- criar um modelo computacional de auxílio na especificação de componentes,
- simulação de influência de parâmetros e análise de erros.

A simulação do sistema inclui os dois processos de medição estático e dinâmico apresentados no capítulo anterior. As considerações utilizadas na formulação das equações 3.7, 3.10 e 3.13 são adotadas também na simulação computacional. O modelo computacional compreende da geração do perfil de tensão elétrica do padrão de difração gerado nos pixel do CCD e também os processamentos estáticos e dinâmicos. Partindo-se de um padrão de difração gerado por um diâmetro simulado, a resposta do modelo é o valor do diâmetro medido através da aplicação dos processamentos citados.

O modelo computacional funciona como importante ferramenta para a escolha das lentes a serem utilizadas, com também para a determinação da potência do laser. Alguns dos erros proporcionados pelo modelo matemático usado também foram simulados.

Uma consideração deve ser feita em relação ao modelo computacional. Por razão de simplificação cada pixel é considerado como indepedente dos demais na sua vizinhança. Na prática o sinal de um pixel é influenciado pela exposição à luz dos pixels adjacentes /53/. No capítulo 5 essa característica é melhor detalhada.

A influência do uso de diferentes focos e potência de laser podem ser verificadas com o auxílio do modelo computacional desenvolvido. As figuras 4.5 e 4.6 apresentam os efeitos da variação do foco e potência do laser respectivamente.

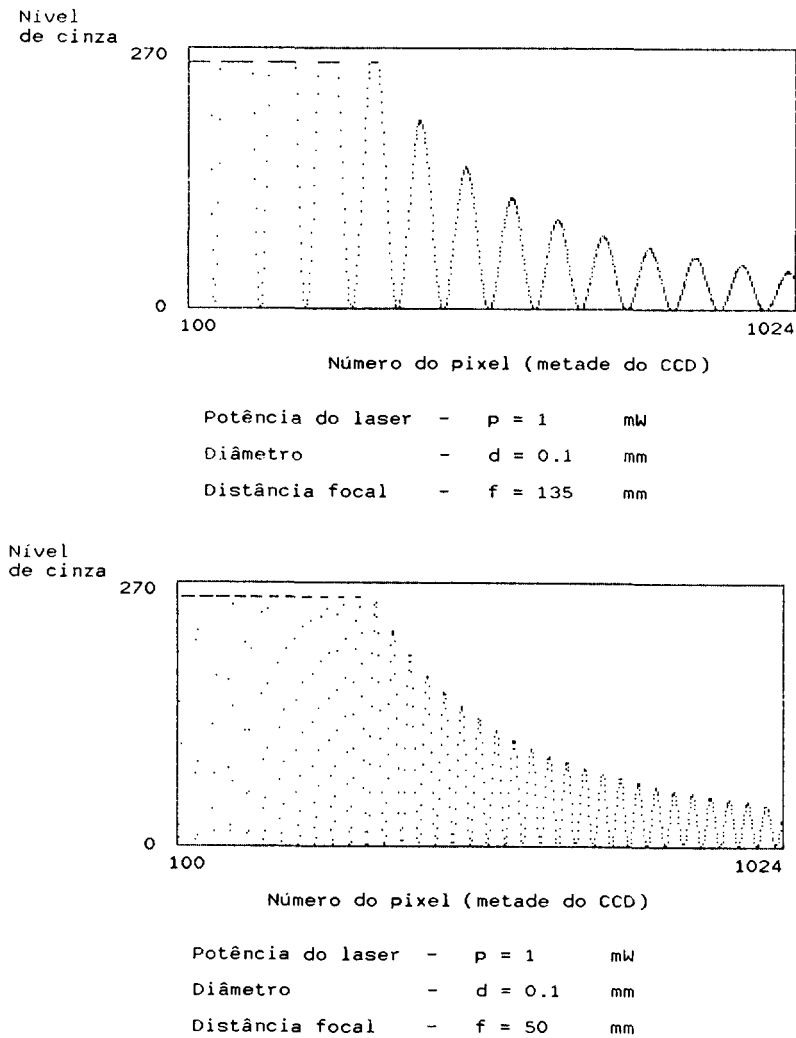


Figura 4.5 - Padrão de difração gerado para um mesmo diâmetro mas com focos diferentes.

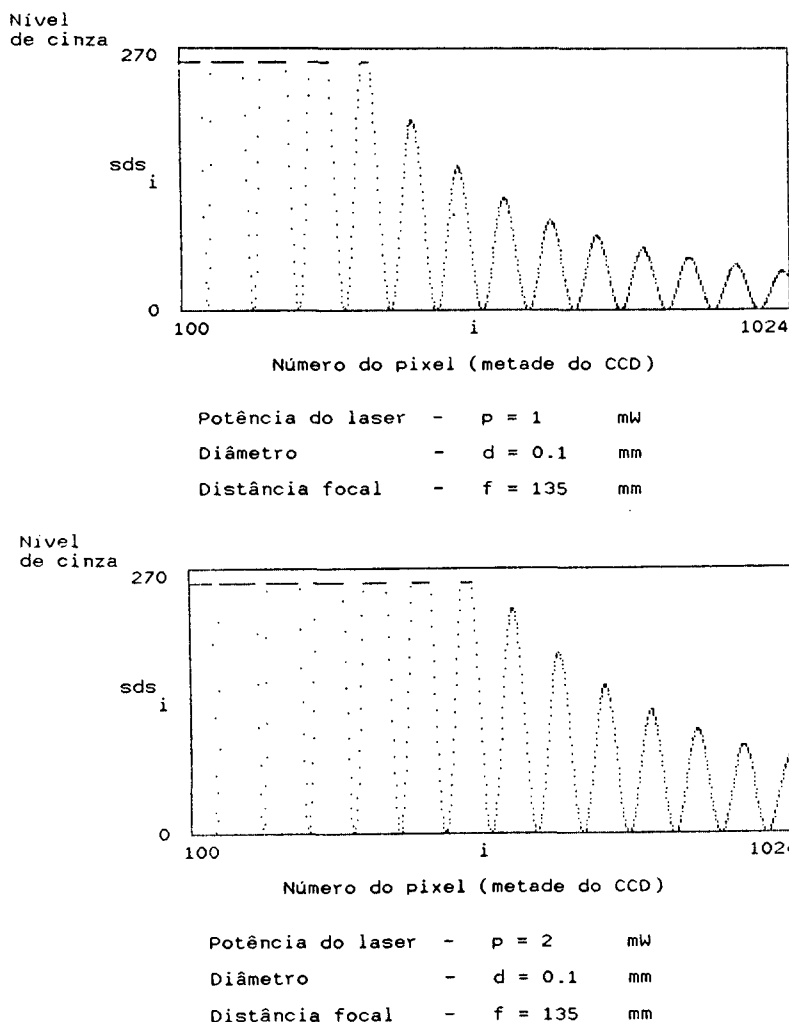


Figura 4.6 - Padrão de difração gerado pelo mesmo diâmetro e mesma lente mas com a potência do laser diferente.

A diminuição do foco da lente faz com que, sobre o mesmo CCD, um maior número de franjas sejam projetadas. A distância entre os mínimos diminui assim como o número de pixel localizados em um vale da franja de interferência. Para um mesmo diâmetro e foco maior, um número menor de franjas forma-se sobre o CCD. Apesar de se melhorar a resolução para a determinação de um mínimo da franja por causa do maior número de pixels em um vale, a medição do mínimo pode ser prejudicada pois o sinal digitalizado de vários pixels podem ter o mesmo nível, por causa da resolução em intensidade do conversor A/D. A variação de irradiância entre os pixels para os focos maiores é mais lenta.

O aumento da potência do laser favorece a uma melhor definição das franjas mais afastadas do centro do CCD. Essas franjas, devido à resolução necessária do sistema, são as de interesse. No capítulo 6 os efeitos do foco e potência do laser são estudados com o auxílio de testes experimentais.

4.3 Fontes de erros

As fontes de erro associadas ao sistema de medição de pequenos diâmetros proposto nesse trabalho são originadas por perturbações externas e perturbações internas. Por ser um sistema de medição por princípio óptico, sem contato mecânico com o diâmetro a ser medido, a retroação do medidor sobre o fio é considerada nula.

O diâmetro a ser medido é definido na equação 4.4, que é a mesma equação 3.10:

$$d = n \cdot \lambda \cdot \sqrt{1 + \frac{f^2}{y_n^2}} \quad (4.4)$$

O diâmetro depende da medição da posição de mínima intensidade de uma franja de interferência, da distância focal da lente e do comprimento de onda da fonte laser. As equações 4.5, 4.6 e 4.7 apresentam as derivadas parciais do diâmetro em relação a cada um desses parâmetros.

$$\frac{\partial d}{\partial y_n} = \frac{-f^2 \cdot d}{(y_n^2 + f^2) \cdot y_n} \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial d}{\partial f} = \frac{f \cdot d}{y_n^2 + f^2} \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial d}{\partial \lambda} = \frac{d}{\lambda} \quad (4.7)$$

A equação 4.8 representa o erro provável na medição do diâmetro devido aos erros na medição do mínimo de uma franja, da distância focal e do comprimento de onda. Considerando-se que todos os erros são estatisticamente independentes, a soma quadrática é usada para se obter o valor do erro máximo provável na medição do diâmetro.

$$\Delta d = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial d}{\partial y_n} \cdot \Delta y_n\right)^2 + \left(\frac{\partial d}{\partial f} \cdot \Delta f\right)^2 + \left(\frac{\partial d}{\partial \lambda} \cdot \Delta \lambda\right)^2} \quad (4.8)$$

Várias são as fontes de erro que influenciam no erro total de medição do diâmetro. A figura 4.7 apresenta o esquema simplificado do sistema de medição com a indicação das principais fontes de erro. Cada fonte de erro é discutida a seguir.

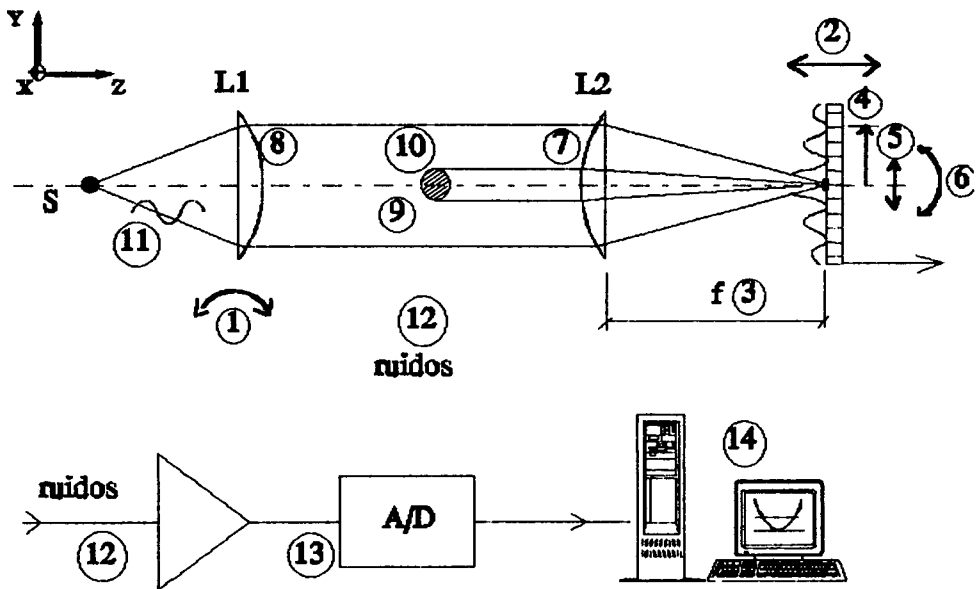


Figura 4.7 - Indicação das principais fontes de erro

Na figura 4.7 os erros foram indicados com números para a identificação dos mesmos na lista que se segue. O eixo óptico da lente EL2 é considerado a referência para os erros de posicionamento dos componentes.

Lista dos erros:

1. Desvio angular do feixe colimado do laser em relação ao eixo óptico da lente L2.
2. Erro de posicionamento do fotodetector CCD no plano focal da lente L2.

3. Valor da distância focal f informada pelo fabricante diferente do foco real.
4. Erro de posição do pixel em relação ao centro do CCD.
5. Erro de posicionamento do centro do CCD em relação ao eixo óptico da lente L2.
6. Desvio angular do CCD em relação ao eixo óptico da lente.
7. Aberrações ópticas da lente L2.
8. Distorção da frente de onda do laser causada por L1.
9. Vibrações mecânicas do fio medido.
10. Erros causados pelas aproximações utilizadas no modelo matemático
11. Variação do comprimento de onda do laser devido à variação de temperatura ambiente.
12. Ruídos ópticos, elétricos, mecânicos, térmicos, etc, gerados interno e externamente ao sistema.
13. Erros de digitalização do sinal de cada pixel.
14. Erros dos métodos de determinação do mínimo da franja.

4.4 Análise de erros

A análise dos erros é baseada em desvios virtuais típicos aplicados a cada fonte de erro, considerando-se o dimensionamento dos principais componentes apresentado nesse capítulo.

Os efeitos dos erros sobre a medição do diâmetro são calculados a partir das equações 4.5, 4.6 e 4.7 quando procedente.

4.4.1 Quantificação dos erros

a) Erros 1, 5 e 6 ;

A combinação dos erros 1, 5 e 6 produzem uma distorção do padrão de difração sobre a superfície do fotodetector. O tipo de erro causado é o sistemático. O modelo matemático utilizado pelo sistema de medição não considera tais desvios. Testes experimentais, que são apresentados no capítulo 6, mostram que o alinhamento entre o laser, lente e CCD se faz necessário para que esse erro sistemático na medição do diâmetro fique abaixo de 0.05 %.

b) Erro 2 ;

O erro típico de posicionamento mecânico de um CCD em relação a uma referência mecânica pode ser considerado menor que 0.05 mm. Com tal erro de posicionamento, a posição das franjas sobre o CCD se desloca fazendo com que um erro sistemático seja introduzido no cálculo do diâmetro. Considerando-se os focos de 50, 85, 105 e 135mm, o erro de medição do diâmetro estimado para o pior caso, para a lente de 50 mm, é de 0.05%. A franja a ser medida deve estar a pelo menos 10mm distante do eixo óptico da lente.

c) Erro 3 ;

Tipicamente os fabricantes de lentes fornecem a informação sobre a distância focal de seus produtos com um incerteza de aproximadamente 1 %. Tal incerteza aplicada à equação 4.6 e considerando $y_1=10\text{mm}$ e $f=50$ (pior caso) produz um erro sistemático no cálculo do diâmetro de 0.96%. Fica claro que para se atingir níveis menores desse erro é necessário uma medição criteriosa da distância focal da lente.

d) Erro 4 ;

Os pixels ao longo do fotodetector linear CCD podem apresentar pequenos erros de posicionamento de seu centro em relação ao centro do CCD. A ordem desses erros é de $0.08p$, onde p é o passo entre pixel. O dimensionamento do CCD define o passo $p=0.013\text{ mm}$ como um valor satisfatório para o atendimento aos requisitos metrológicos desejados. Portanto, erro de aproximadamente $1\text{ }\mu\text{m}$ do centro do pixel causa a mesma variação na medição do mínimo de uma franja. Tal erro produz uma variação de 0.008% na medição do diâmetro. Esse erro é considerado desprezível.

e) Erro 7 ;

Certamente esse tipo de erro é o mais difícil de ser calculado pela complexidade de medição de aberrações para sistemas ópticos diferentes de sistema de imagem como é o caso do sistema de medição proposto nesse trabalho. Outro ponto que dificulta a avaliação dos erros causados pela lente é a falta de informação desse tipo em catálogos de fornecedores de lentes comerciais. As lentes utilizadas são avaliadas então através de seus desempenhos na medição de pequenos diâmetros. Tais avaliações são apresentadas no capítulo 6.

f) Erros 8 e 9 ;

A frente de onda do feixe de laser diodo apresenta distorções. Idealmente a frente de onda deveria ser plana, de forma que vibrações do fio não deveriam interferir no padrão de difração. Na prática, a combinação da distorção da frente de onda e as vibrações do fio a ser medido causam variações da posição das franjas de interferência provocando erros de medição do diâmetro. Além das vibrações lineares, o fio a ser medido também pode vibrar angularmente fazendo com que o padrão de difração gire em relação ao CCD. As variações de irradiância detectadas pelo pixel devido a esse giro também provocam erros na medição do diâmetro. Tais erros acima citados são avaliados e quantificados por testes experimentais apresentados no capítulo 6.

g) Erro 10 ;

Como foi discutido no capítulo 3, uma série de aproximações foram utilizadas para o desenvolvimento do modelo matemático adotado neste trabalho considerando-se os efeitos da reflexão na superfície do fio medido. Os erros causados por essas aproximações também são avaliados por calibrações apresentadas no capítulo 6.

h) Erro 11 ;

Uma característica inerente ao diodo laser é a grande sensibilidade do seu comprimento de onda à variação de temperatura ambiente. Tipicamente o diodo laser que não possui sistema controlador de temperatura internamente apresenta uma variação no comprimento de onda na ordem de 0.25 nm/K /64/. Em ambiente industrial, onde o sistema de medição proposto deve operar, uma variação de 10 K é considerada comum, portanto, para essa variação de temperatura espera-se uma variação de comprimento de onda de 2.5 nm. Pela equação 4.7 e utilizando-se a equação 4.8 simplificada para a avaliação do erro somente de λ , o erro percentual sobre o diâmetro será de aproximadamente 0.37%. Esse erro será aleatório se a temperatura oscilar de forma imprevisível. Se não, o erro será sistemático caso a temperatura se estabilize em patamares diferentes.

i) Erro 12 ;

Os ruídos ópticos, elétricos/eletromagnéticos/eletrônicos, mecânicos (vibrações nos componentes) e térmicos são avaliados em testes operacionais apresentados no capítulo 6.

j) Erro 13 e 14;

Os erros de digitalização e dos métodos utilizados para a medição do mínimo de uma franja são avaliados e quantificados através de simulação computacional. A superposição dos erros de digitalização e do método de ajuste de uma parábola no vale da franja apresentou um erro simulado na faixa de $\pm 0.03\%$. Esse erro está relacionado com o processo de medição estático, onde o método de ajuste de uma parábola no vale da franja é usado na medição da posição do seu mínimo. O erro de digitalização conjuntamente ao erro do método da referência, explicado no item 4.1.3, é também avaliado por simulação na ordem de $\pm 0.05\%$. Tal método é aplicado no processamento dinâmico da medição relativa do diâmetro. Juntamente a esse erro no processamento dinâmico, a simplificação matemática definida pela equação 3.13 é utilizada. Essa aproximação matemática, segundo simulação, gera erro de medição de $\pm 0.05\%$ se a faixa de operação não ultrapassa 5%.

4.4.2 Contabilização dos erros

A maioria dos erros relacionados no item anterior só podem ser quantificados através de ensaios experimentais. No entanto, alguns erros são quantificados ou por simulação computacional ou por informações de catálogos. A contabilização desses erros é mostrada abaixo na figura 4.8.

	Erro Sistemático Estimado (%)	Dispersão da Medição Estimada (%)	Incerteza de Medição Estimada (%)
Processo Estático de Medição	0.15 ^a	± 0.1 ^b	± 0.25 ^c
Processo Dinâmico de Medição	0.15 ^a	± 0.15 ^b	± 0.3 ^c

^a Para a obteção desse erro estimado foi considerado que o valor de f é conhecido com incerteza de aproximadamente 0.1%.

^b Foi considerado que a variação da temperatura sobre o laser não é maior que 3 K.

^c Não foram consideradas no cálculo da incerteza de medição estimada do sistema proposto as seguintes fontes de erro: aberrações ópticas, vibrações do fio, ruídos, erros do modelo e distorções da frente de onda do laser.

Figura 4.8 - Erros estimados do sistema de medição proposto

Somente com a calibração do sistema proposto é que se pode avaliar seu desempenho metrológico e operacional, contudo essa avaliação preliminar é importante para que as fontes críticas de erro sejam identificadas, como é o caso do erro de medição do foco da lente e a variação de comprimento de onda do laser diodo com a temperatura. No capítulo 6 alguns testes experimentais de desempenho metrológico e operacional do sistema são apresentados.

5. PROTÓTIPO FUNCIONAL

Este capítulo apresenta o protótipo funcional do sistema de medição de pequenos diâmetros de fios metálicos. São apresentadas as considerações de projeto do protótipo como também os módulos que o compõem.

Protótipo funcional é definido neste trabalho como o protótipo que atende aos requisitos metrológicos e operacionais, porém ainda na forma de montagem de bancada de laboratório. Testes desse protótipo auxiliam na avaliação do princípio de medição adotado bem como o desempenho metrológico e operacional do sistema de medição.

Como o protótipo funcional tem o objetivo de avaliar o princípio utilizado no sistema de medição, componentes comerciais facilmente adquiridos no mercado são utilizados para a redução do tempo necessário na sua montagem.

5.1 Considerações gerais de projeto

Como foi mencionado anteriormente, componentes comerciais de fácil aquisição no mercado são utilizados no protótipo funcional. Atendendo-se ao dimensionamento apresentado no capítulo 4 e aos requisitos metrológicos definidos no capítulo 3, tais componentes são especificados para a construção de uma montagem em bancada de laboratório do sistema de medição de pequenos diâmetro.

Um sistema de visão de máquina (Machine Vision System), composto de câmera, placa de processamento, computador e software, é utilizado para a aquisição e processamento do padrão de difração de Fraunhofer. Esse sistema pode ser adquirido no mercado como um pacote pronto, o que significa que seus componentes já estão integrados.

Como também foi citado no item 4.1.3, a não disponibilidade de uma câmera comercial com sensor óptico CCD de grande abertura lateral e bom desempenho funcional contribuiu para que uma câmera com pixel de pequena abertura seja utilizada neste trabalho. A consequência disto está no limite permitido do posicionamento angular do fio em relação à câmera. Testes experimentais apresentados no capítulo 6 avaliam os ângulos máximos permitidos.

Diferentes lentes fotográficas são utilizadas para a avaliação da influência do foco na medição das franjas do padrão de difração. Lentes fotográficas com 50, 85, 105 e 135 mm de grande abertura são testadas no protótipo funcional.

Uma laser diodo de luz visível é utilizado no protótipo. Testes de avaliação desse componente também são apresentados no capítulo 6.

O protótipo é montado sobre uma bancada óptica onde dispositivos mecânicos são utilizados para a fixação dos componentes, como também na movimentação dos mesmos para as atividades de alinhamento e avaliação de erros de posicionamento. Também no capítulo 6 são apresentados considerações sobre alinhamentos e erros de posicionamento.

Aspectos de custos não são considerados na montagem do protótipo funcional cujos componentes são especificados por suas características técnicas e pela rapidez de obtenção no mercado e operacionalização.

5.2 Módulos

O protótipo funcional é dividido em módulos segundo suas funções no processo de medição de diâmetro. A figura 5.1 apresenta o esquema dos módulos do protótipo do sistema de medição destacando-se os seus principais componentes.

O módulo Cabeçote de Medição é formado pelo laser, lente, câmera e suporte mecânico. Este cabeçote de medição é separado da placa de processamento e computador pela necessidade imposta do processo de fabricação industrial de fios metálicos. O cabeçote deve ser compacto, robusto e de fácil manuseio junto à linha de produção. O protótipo funcional, apesar de não ser avaliado em ambiente industrial, considera alguns requisitos operacionais do ambiente industrial. O cabeçote de medição pode ser localizado até 5 m longe da placa de processamento e computador. A figura 5.2 apresenta a vista geral do protótipo funcional construído. A descrição de cada módulo é apresentada nos itens que se seguem.

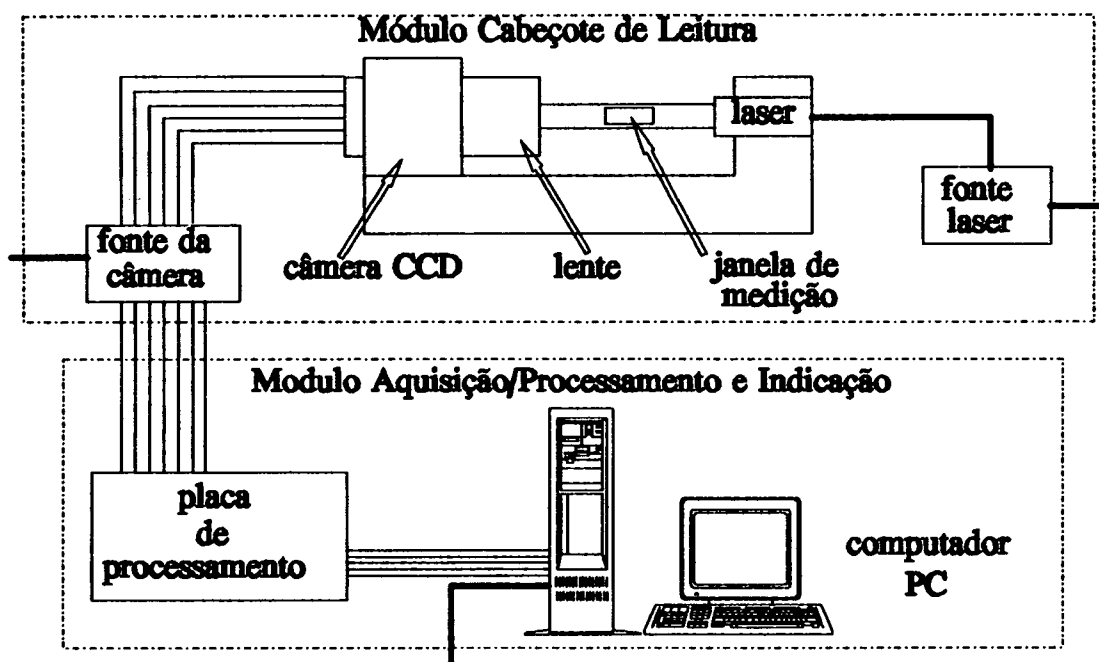


Figura 5.1 - Esquema geral do protótipo funcional

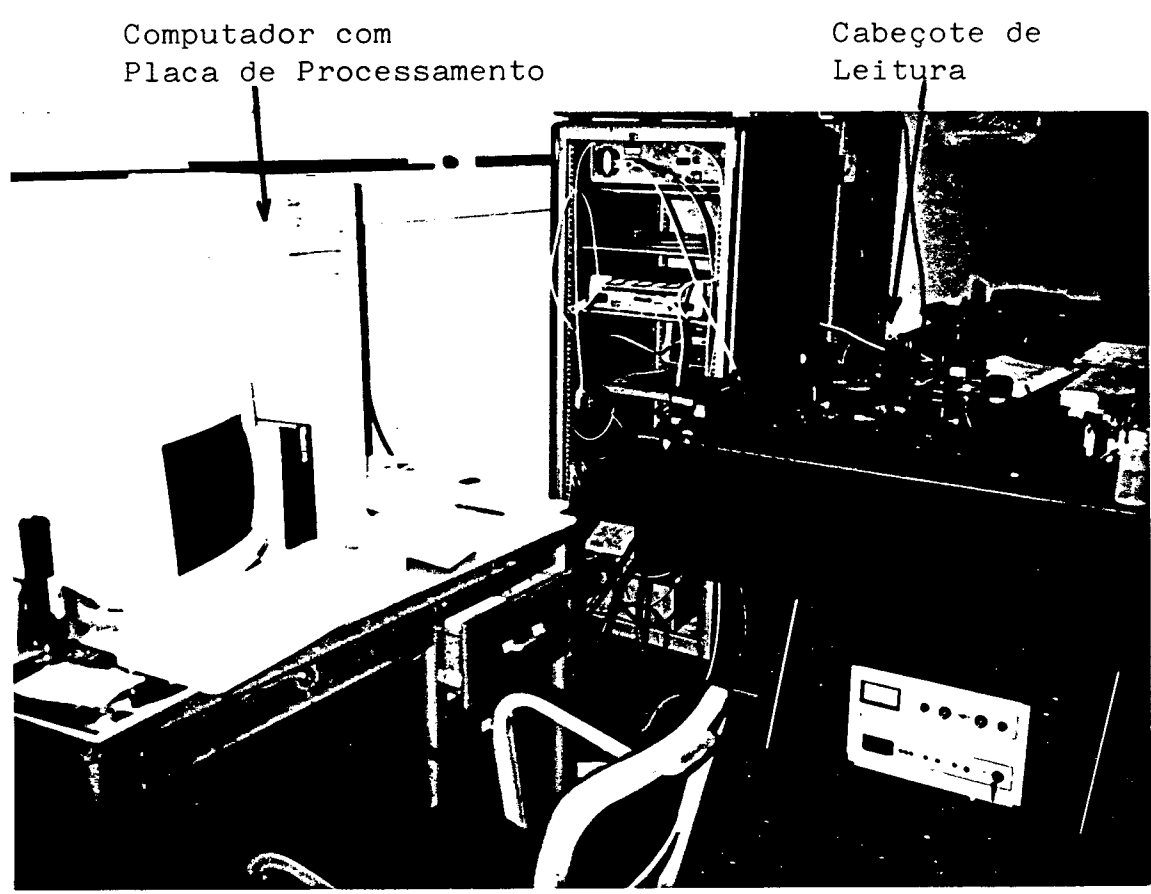


Figura 5.2 - Visão geral do protótipo funcional

5.2.1 Módulo cabeçote de medição

O Módulo Cabeçote de Medição tem a função de gerar um sinal de vídeo cujo perfil é equivalente ao padrão de difração ocasionado pelo fio metálico exposto a um feixe colimado do laser. O módulo é composto pelo laser diodo/fonte, lente, câmera linear CCD/fonte e estrutura de suporte mecânico. A figura 5.3 apresenta este módulo.

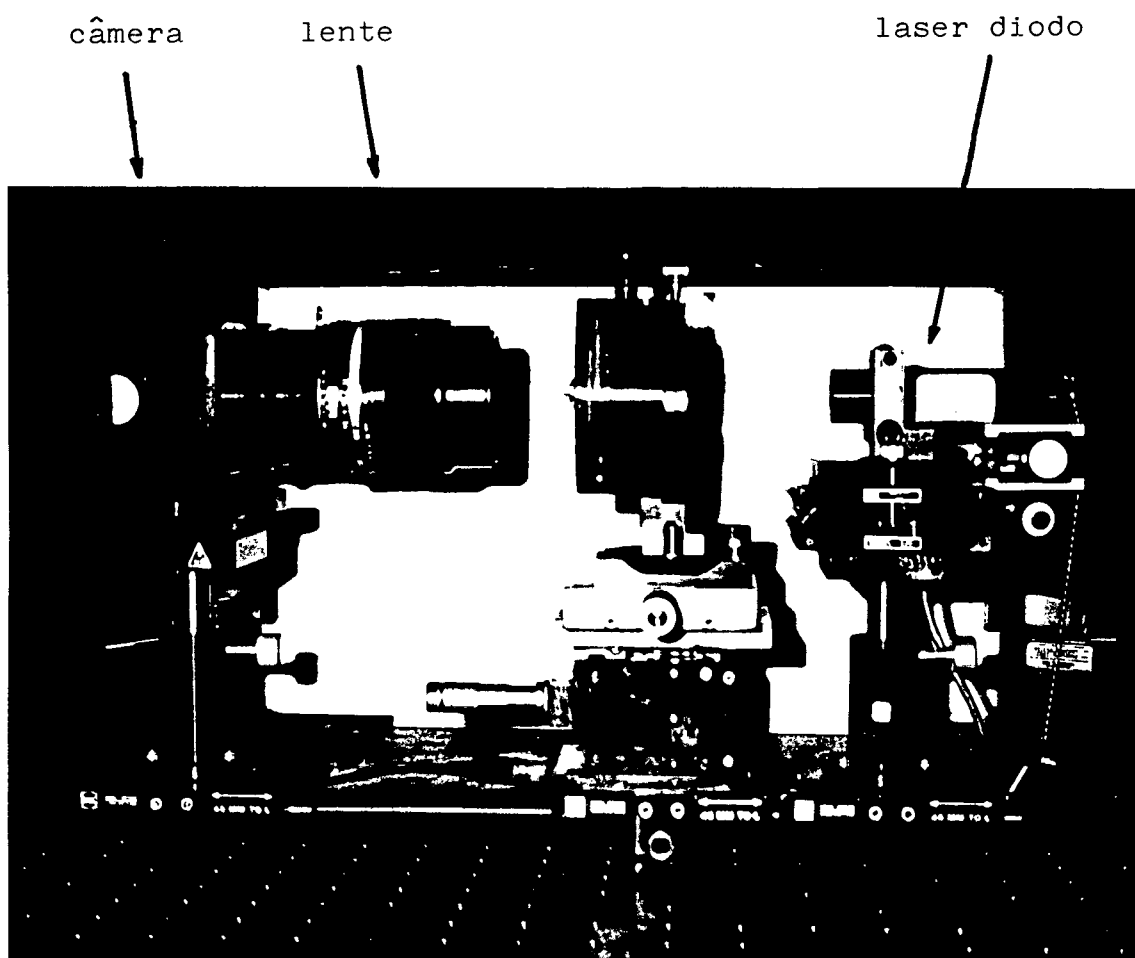


Figura 5.3 - Vista frontal do módulo cabeçote de medição

A seguir os principais componentes desse módulo são discutidos.

a) Laser

A função do laser diodo é gerar uma frente de onda plana onde o fio é colocado, gerando-se a difração. As principais características do laser diodo são apresentadas abaixo /64/.

Comprimento de onda - $\lambda = 0.670 \mu\text{m}$

Potência de saída - regulável entre 0.5 e 4.25 mW,

Dimensões do feixe - 4.0 mm/1.0 mm

Vida de operação - > 100 000 horas

Largura de banda - < 0.01 nm

Dimensões externas - diâmetro 22 mm e comprimento 85 mm

Tipo de polarização - linear 100:1

Outras características estão quantificadas na referência /64/. A figura 5.4 apresenta um esquema do laser em corte e suas principais partes.

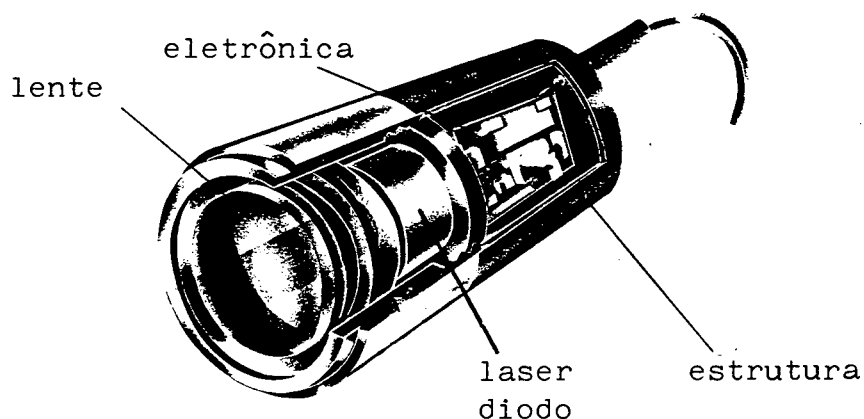


Figura 5.4 - Esquema do laser diodo

b) Lente

Como já foi discutido no capítulo 3, a lente permite que se observe o padrão de difração de Fraunhofer na região de Fresnel. A lente realiza uma manipulação do sinal de difração originado nas bordas do fio a ser medido. Em seu plano focal o sensor óptico é colocado.

As lentes fotográficas comercialmente disponíveis são utilizadas no protótipo. Lentes de 50, 85, 105 e 135 mm são testadas. As suas aberturas são suficientes para que suas bordas não interfiram no padrão de difração.

Informações técnicas típicas são fornecidas pelos fabricantes na forma de catálogos /60/. A figura 5.5 apresenta um esquema de uma lente utilizada.

105mm f/2.5

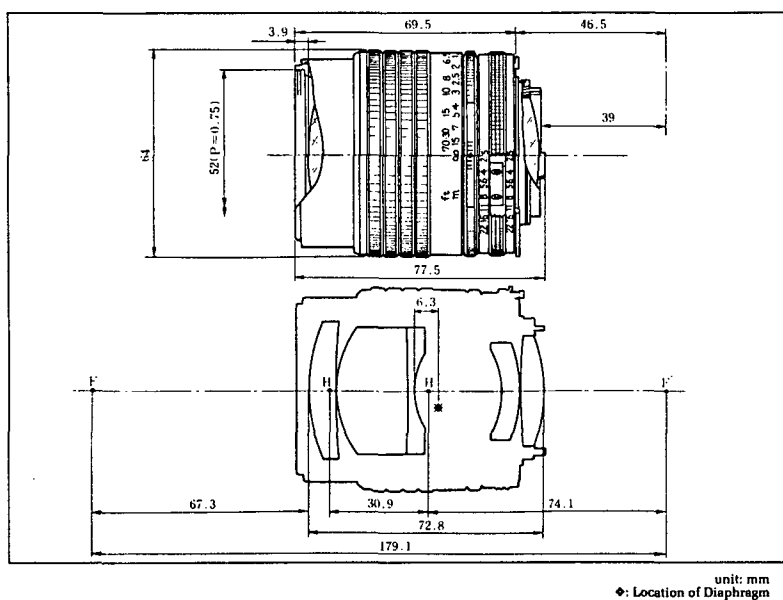


Figura 5.5 - Esquema de uma das lentes fotográficas usadas.

Tubos de extensão são utilizados segundo o tipo de fixação mecânica na câmera. O padrão tipo F, tipo baioneta /60/, é utilizado para interfacear mecanicamente a lente e o tubo de extensão. A outra extremidade do tubo de extensão apresenta um tipo de rosca compatível com a câmera linear usada /53/.

c) Câmera linear

Uma câmera linear CCD industrial é utilizada no protótipo funcional. Esta câmera linear CCD possui como principal elemento o fotodetector CCD. A câmera também possui circuitos eletrônicos que, dentre outras tarefas, realizam funções de condicionamento do sinal, redução de ruídos, interfaceamento, sincronização, obturação eletrônica, circuito anti-saturação, etc. A figura 5.6 apresenta a vista frontal da câmera linear CCD acoplada a uma lente fotográfica /67/.

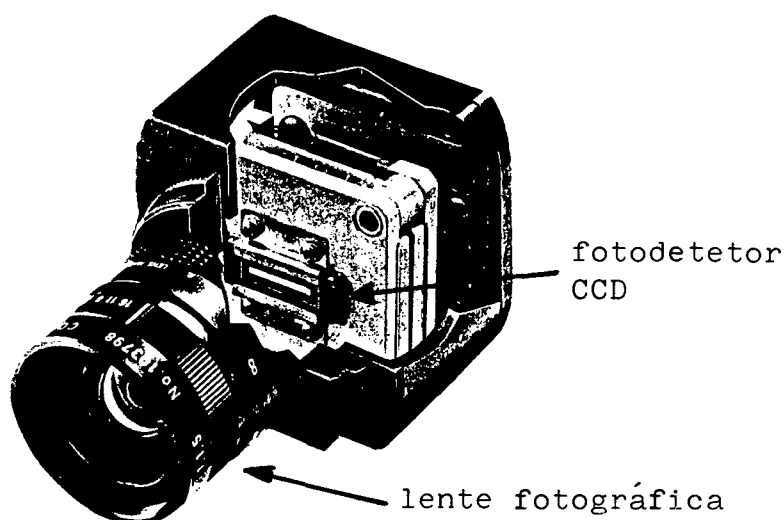


Figura 5.6 - Vista frontal em corte da câmera linear CCD industrial

O elemento principal da câmera é o fotodetector linear CCD. Cada pixel do fotodetector possui a geometria apresentada na figura 5.7 /53/. A abertura lateral do pixel é de $26\text{ }\mu\text{m}$ e o espaçamento entre pixel é de $13\text{ }\mu\text{m}$. O número total de pixels é de 2048. A resposta à luz incidente ao longo do pixel também é mostrada no gráfico na figura 5.7. Pode-se notar que o sinal de cada pixel sofre a influência do pixel vizinho e também perturba o sinal de outro vizinho. Tal característica indica que cada pixel não é independente e portanto sofre a influência da irradiância incidente sobre um pixel ao seu lado.

A arquitetura usada em fotodetetores CCD em câmeras comerciais /53/ é mostrada na figura 5.8. A arquitetura permite que o excesso de carga gerado pelo pixel, caso haja uma exposição excessiva à luz, seja drenado por um transistor sem que o sinal dos demais fotossensores seja perturbado. Na figura 5.8, cada transistor de drenagem está ligado a uma tensão V_{ab} que define o nível máximo do sinal do pixel. Em condições normais de incidência de luz sobre o pixel, após o tempo de integração, a câmera envia sinal de transferência para que os sinais de tensão gerados em cada pixel sejam transferidos para o registrador CCD. Nesse registrador os sinais de tensão são transferidos para fora da câmera de forma seriada /53/. Utilizam-se dois registradores pois a leitura dos fotossensores (pixels) pares é feita paralelamente à leitura dos ímpares. Posteriormente o sinal de tensão de cada pixel é multiplexado e convertido digitalmente através de um conversor A/D na placa de processamento.

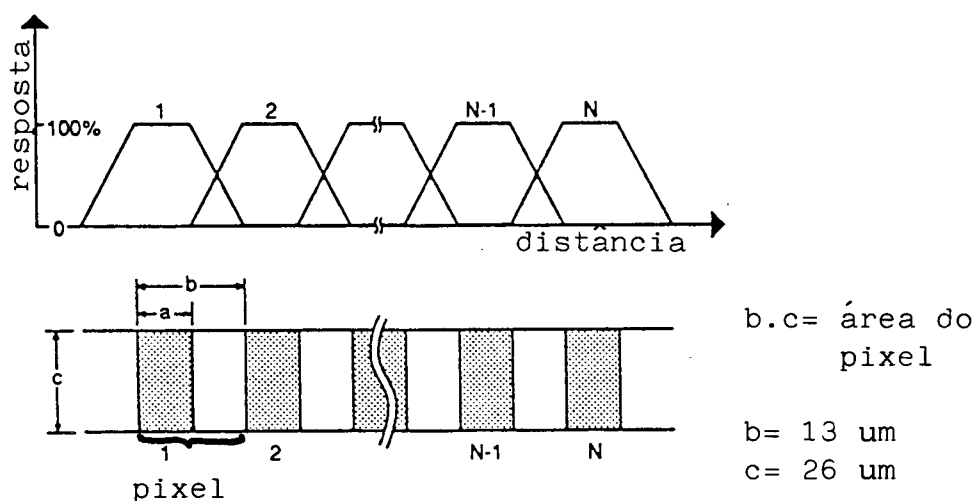


Figura 5.7 - Geometria do CCD e a sensibilidade dos pixels à luz

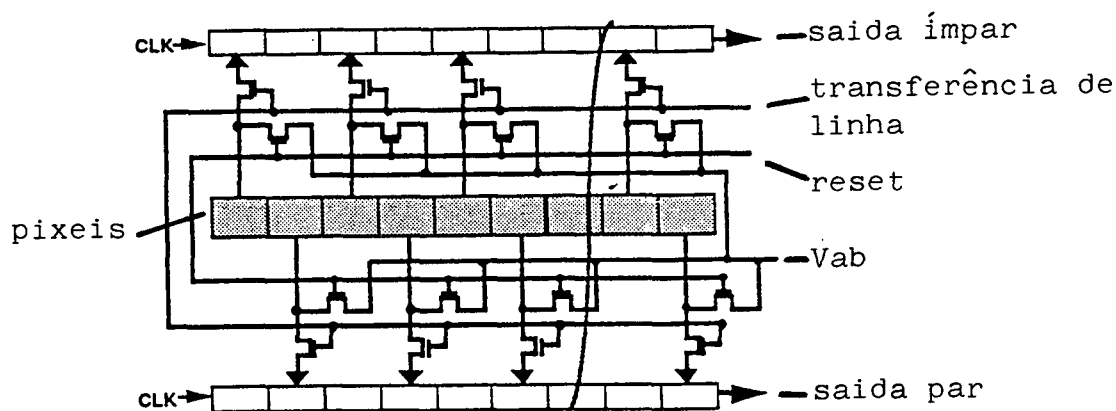


Figura 5.8 - Arquitetura do CCD

No protótipo funcional do sistema de medição de pequenos diâmetros, uma máscara de proteção é colocada na parte central do fotodetector linear CCD. A função dessa máscara é explicada no capítulo 3. Uma tira de papel negro é colocada na região central do CCD para se evitar a exposição excessiva dos pixels aos feixes de laser não difratados. A figura 5.9 mostra a máscara.

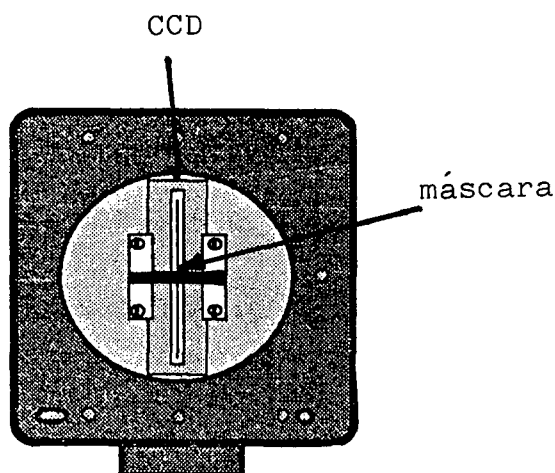


Figura 5.9 - Máscara posicionada no centro do CCD

A câmera é ligada à sua fonte através de cabos especiais que são insensíveis a ruídos. A fonte pode ser posicionada até 2 metros de distância da câmera. A fonte é ligada a uma placa de processamento e controle que é conectada ao barramento de um computador tipo PC. Os sinais de controle da câmera e das tensões geradas no pixel são apenas conectados na fonte de energia da câmera sem que esta interfira nos mesmos.

d) Estrutura mecânica / suporte

O protótipo funcional, como já foi mencionado, é montado sobre uma bancada óptica em laboratório. Dispositivos mecânicos de fixação e ajuste de componentes foram utilizados. Basicamente são utilizados dispositivos de fixação da câmera e do laser. Mesas micrométricas são usadas para o alinhamento entre o laser e a câmera.

Outras mesas de deslocamento vertical, horizontal e angular são usadas para o ajuste da posição do fio a ser medido e para os testes de sensibilidade do protótipo aos movimentos do fio. Tais movimentos simulam as vibrações mecânicas sofridas pelo fio em ambiente industrial. Como é mostrado no capítulo 6, os erros devido à variação de posição do fio são levantados em experimentos estáticos.

A figura 5.10 apresenta uma vista geral dos dispositivos mecânicos de fixação e ajuste de posição.

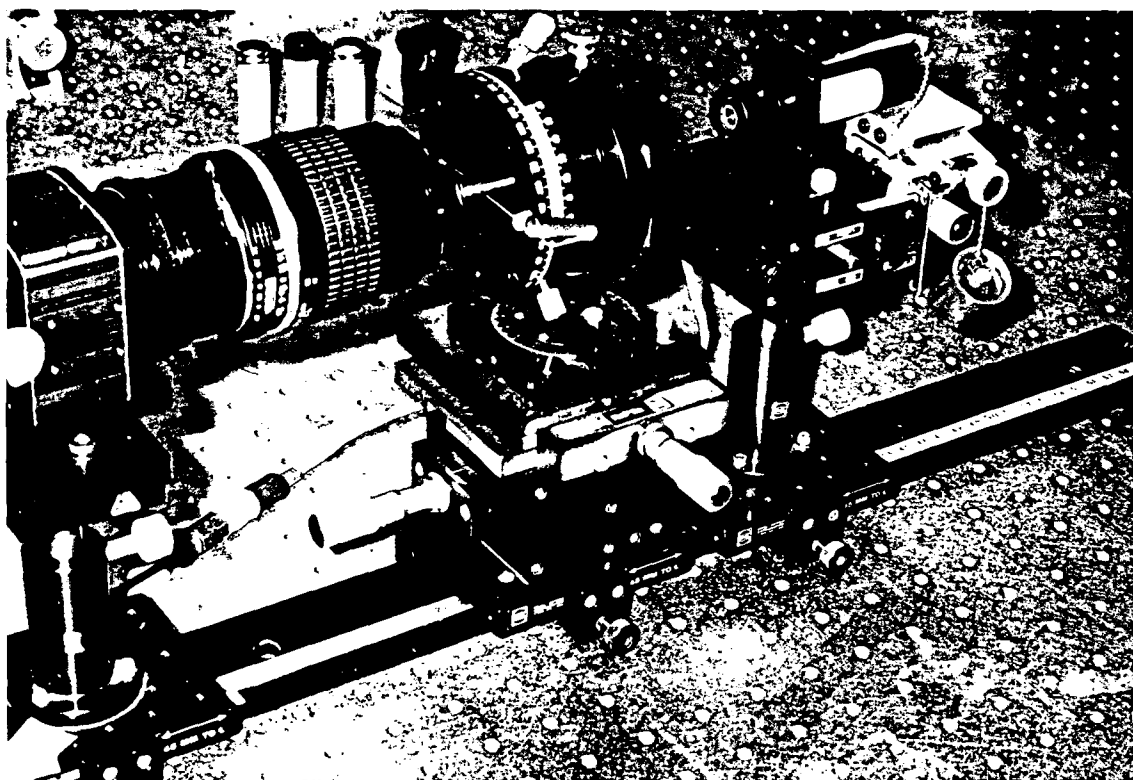


Figura 5.10 - Visão geral dos dispositivos de fixação e ajuste

5.2.2 Módulo aquisição/processamento e indicação

O módulo aquisição/processamento e indicação é composto pela placa de processamento, software e computador. O próprio nome dado a esse módulo define sua função. O sinal de video, enviado pela câmera, é aqisicionado pela placa de processamento, digitalizado, armazenado em memória e processado através de um programa de computador. A figura 5.11 apresenta o esquema desse módulo.

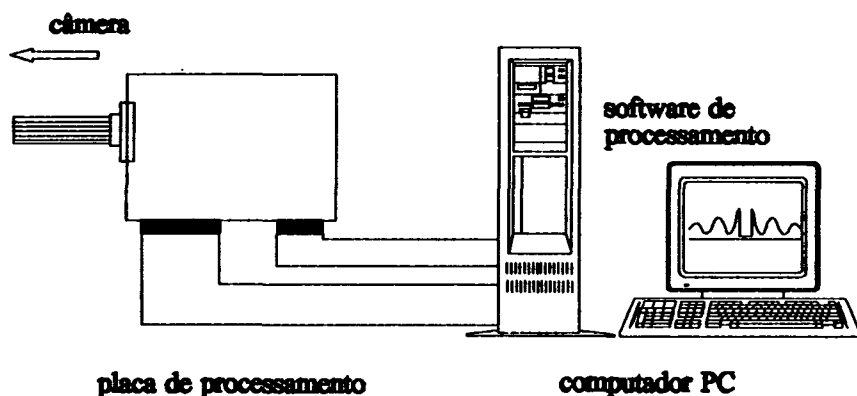


Figura 5.11 - Esquema geral do módulo aquisição/ processamento e indicação.

Cada componente desse módulo é melhor detalhado abaixo:

a) Placa de processamento

A placa de aquisição e processamento é uma placa comercial /53/, /61/, compatível com a câmera linear e computador tipo PC. Além das atividades de aquisição e processamento em tempo real do sinal de video proveniente da câmera, esta placa realiza tarefas de controle da câmera em termos da determinação da taxa de varredura do CCD e sincronização.

O sinal de video oriundo da câmera é adquirido pelos canais A e B. Por cada um desses canais, o sinal de vídeo é adquirido dos fotossensores pares ou ímpares. Após os sinais terem sido adquiridos e ajustados automaticamente à variações de temperatura, o sinal de cada pixel é digitalizado e posteriormente multiplexado. A partir daí, a placa oferece recursos para ajuste de ganho, offset, armazenamento em memória e processamento digital em tempo real. Através de um software dedicado, todas as funções da placa podem ser controladas. A figura 5.12 apresenta de forma esquemática o diagrama de blocos da placa utilizada no protótipo funcional /61/.

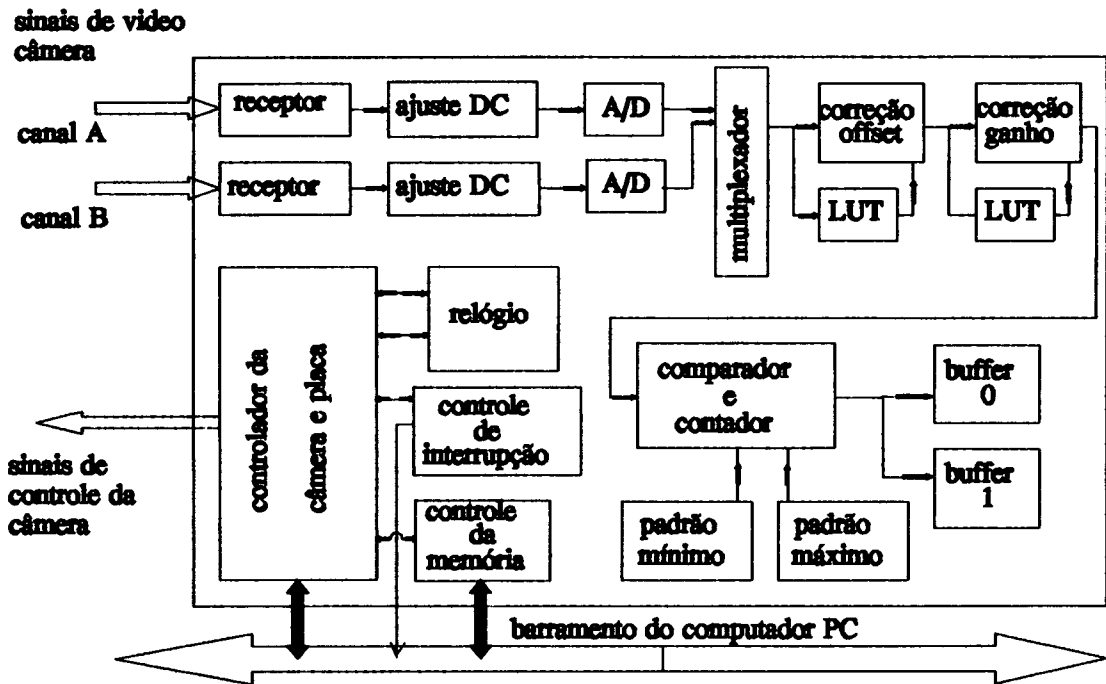


Figura 5.12 - Diagrama de bloco da placa de processamento

A função de processamento em tempo real disponível na placa é a "Template Matching" (Comparação de Padrão) onde o sinal digitalizado de cada pixel é comparado a um valor máximo e mínimo. O circuito dessa função compara o sinal de cada pixel com os valores armazenados em memória. Quando o valor do sinal está fora da faixa definida pelos valores máximos e mínimos, a placa sinaliza um erro identificando o pixel onde aconteceu o erro e conta o número total de pixels fora da faixa programada.

A velocidade desse processamento é muito alta pois é feito na placa sem a participação do computador. Esse processamento é adequado ao processamento dinâmico descrito no capítulo 3 e 4, onde uma franja pode ser monitorada através da contagem de pixels abaixo de uma referência programada. A figura 5.13 apresenta um sinal típico digitalizado e os valores de comparação pré-programados para a determinação em tempo real da posição do mínimo da franja usando-se a função de processamento em tempo real na placa. Após a determinação da posição do mínimo, esta pode ser comparada à posição medida no processo de medição estático e, aplicando-se a equação 3.13, o diâmetro do fio pode ser determinado.

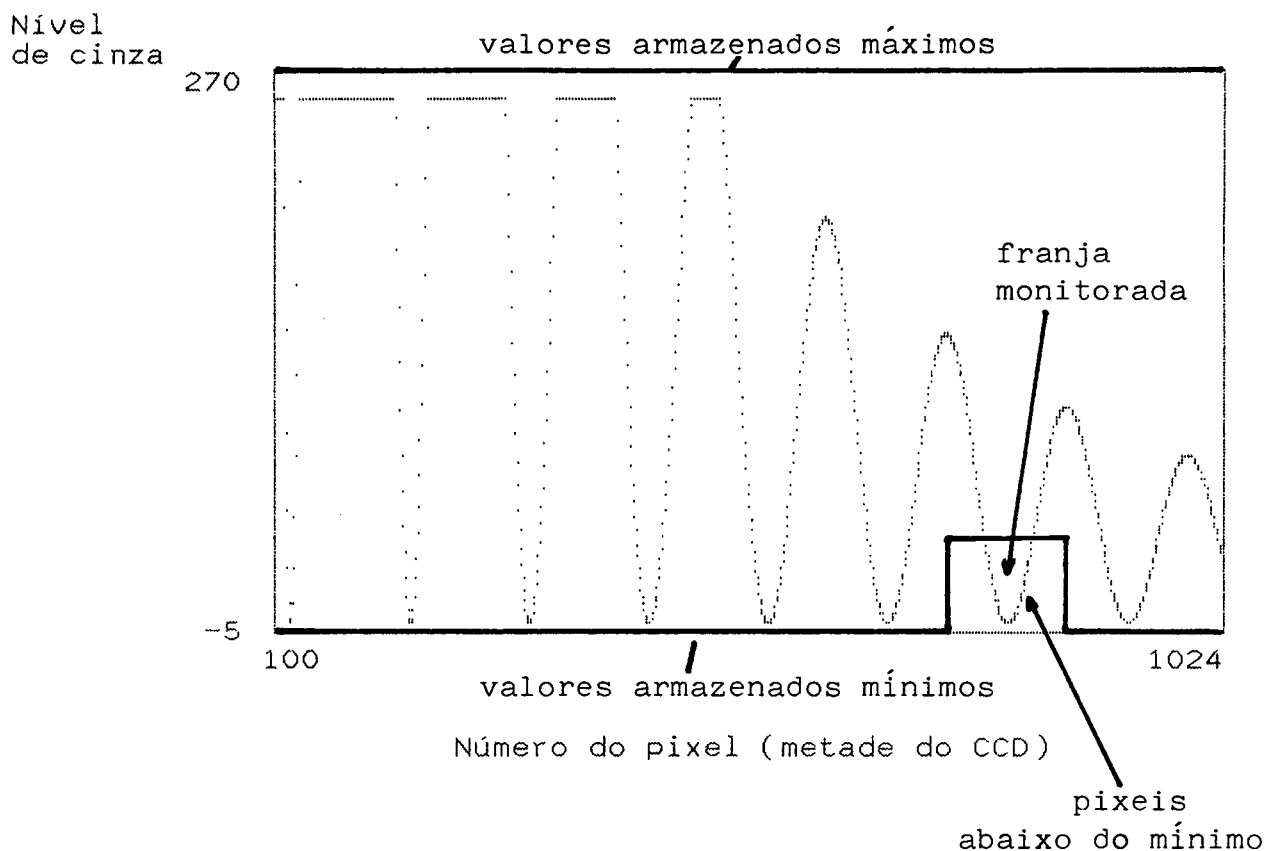


Figura 5.13 Processamento em tempo real para a determinação da posição da franja monitorada.

b) Software

Um software utilitário acompanha a placa de processamento /61/. Com esse programa, todas as funções de controle e ajuste da câmera podem ser realizadas. Além disso, podem ser programadas as funções de ajuste e processamento do sinal de vídeo da câmera. O programa ainda oferece a função de aquisição, armazenamento e indicação da varredura do CCD na tela do computador.

Arquivos podem ser gerados para posterior utilização por outros programas aplicativos. No protótipo funcional desenvolvido, o processamento matemático descrito no capítulo 3 é realizado através do uso de um aplicativo de matemático /68/.

5.3 Funcionamento e operação do protótipo funcional

Como já foi mencionado anteriormente, o protótipo funcional tem por objetivo testar o princípio de medição adotado no sentido de determinar seu desempenho metrológico e operacional. O uso de componentes comerciais acelera o processo de avaliação do princípio de medição e dos métodos de processamento adotados pela rápida montagem do protótipo.

A instalação e operacionalização do laser, câmera linear industrial, placa de processamento e software é definida pela documentação técnica dos fabricantes já relacionadas.

Os ajustes necessários para a operacionalização do protótipo funcional para a medição de pequenos diâmetros são relacionados no capítulo 6, no item denominado "Testes iniciais e ajustes".

Após o alinhamento dos componentes, ajustes e alinhamento do fio na janela de medição, o sinal de vídeo da câmera é aquisicionado e armazenado na memória da placa de processamento na forma de um arquivo com o auxílio do programa que acompanha a placa de processamento. Com a utilização de um outro programa, aplicativo de matemática /68/, o processamento estático descrito no capítulo 3 é implementado para se determinar o diâmetro do fio.

Cabe destacar que o processamento dinâmico de medição, descrito no capítulo 3, e o processamento em tempo real adequado descrito acima não foram implementados para a realização dos testes experimentais de avaliação descritos no capítulo 6. Limitações de tempo impuseram restrições à implementação do processo dinâmico de medição de pequenos fios metálicos proposto nesse trabalho. Contudo toda metodologia foi apresentada e uma série de testes experimentais estáticos indicam a potencialidade do método dinâmico.

6. TESTES EXPERIMENTAIS

O objetivo principal dos testes experimentais é a avaliação do desempenho metrológico e operacional do protótipo funcional desenvolvido. Os testes são divididos em três grupos: testes de ajustes, testes metrológicos e testes operacionais.

Os testes de ajustes determinam as condições ideais de ajustes e alinhamentos dos componentes do protótipo funcional. Os testes metrológicos avaliam o seu desempenho metrológico, e por fim, os testes operacionais têm o objetivo de determinar o comportamento do protótipo em condições típicas de operação na aplicação industrial de medição de pequenos diâmetros.

Como foi mencionado no final do capítulo 5 que somente testes metrológicos estáticos são realizados. As medições de pequenos diâmetros são feitas de forma estática, ou seja, durante o processo de medição, o valor e a posição do diâmetro são mantidos constantes.

6.1 Testes de ajustes

Os testes de ajustes têm o objetivo de avaliar a influência de diversos parâmetros iniciais de ajuste sobre o comportamento do sistema de medição desenvolvido. Os parâmetros iniciais de ajuste são descritos nos itens que se seguem.

6.1.1 Potência do laser

A potência do laser é um importante parâmetro que deve ser ajustado para a melhoria do desempenho do protótipo funcional. A potência do laser diodo está relacionada com a qualidade do sinal óptico do padrão de difração.

A potência do laser diodo usado no protótipo funcional pode ser regulada entre os valores de 0.5 e 4.25 mW. Em baixa potência, a banda espectral do feixe de laser é maior fazendo com que o contraste das franjas de difração seja diminuído prejudicando a determinação de suas posições.

Também em baixa potência, a razão de polarização diminui. Testes mostram que para o tipo de laser diodo usado, a razão de polarização varia de 100:1 para 40:1 quando se altera a potência do feixe laser de 4.25 mW para 0.5 mW. O aumento dos raios de luz com polarização aleatória no feixe laser também contribui para a diminuição do contraste das franjas do padrão de difração.

A potência do laser diodo é então ajustada para 4.25 mW (potência máxima) para a melhoria da qualidade do padrão de difração em termos de melhor contraste das franjas de interferência e diminuição dos ruídos ópticos.

6.1.2 Focagem do sistema

A focagem do sistema é a operação de ajuste da posição do CCD em relação ao plano focal da lente fotográfica do protótipo funcional. Essa operação é bastante simples, pois as lentes fotográficas utilizadas já possuem sistemas mecânicos de ajuste de foco. Para que o CCD da câmera industrial se localize no plano focal da lente, esta deve ser ajustada como se estivesse focalizando um ponto objeto localizado no infinito. Não são realizados ajustes angulares entre a lente e o CCD pois a interface mecânica entre lente e a câmera industrial CCD não permite tais ajustes. Estes erros de posicionamentos são controlados pelas tolerâncias de fabricação e montagem desses dispositivos mecânicos, que são adquiridos no mercado.

6.1.3 Alinhamento dos componentes ópticos

Como foi mencionado anteriormente, o alinhamento entre a lente e a câmera CCD é controlado pelas tolerâncias das interfaces mecânicas, do suporte do CCD e conjunto mecânico da lente. Nenhum ajuste externo adicional se faz necessário.

O alinhamento entre o diodo laser e a lente deve ser realizado para que o padrão de difração incida simetricamente sobre a superfície do CCD. Desalinhamentos entre o eixo óptico da lente e o eixo de propagação do feixe colimado do laser provocam erros sistemáticos na medição de pequenos diâmetros. A figura 6.1 mostra o desalinhamento entre o laser e a lente que altera a posição do padrão de difração e distorce a posição dos mínimos das franjas de interferência.

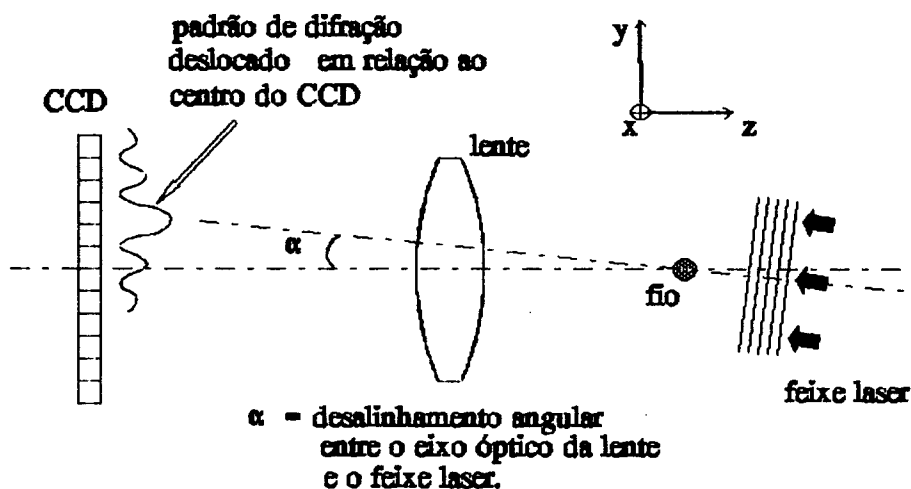


Figura 6.1 - Desalinhamento angular entre a lente e o laser

A operação de alinhamento angular entre o laser e a lente no plano ZY pode ser realizado utilizando-se o próprio protótipo funcional através da medição das posições de duas franjas equidistantes do centro do padrão de difração. O laser estará alinhado em relação ao eixo óptico da lente quando as posições dos mínimos das franjas forem simétricas em relação ao centro do CCD, considerando-se que o CCD já está alinhado em relação à lente. Testes experimentais mostram que desalinhamentos que causam variações das posições de duas franjas simétricas de até 2.p (duas vezes o passo entre pixels) provocam erros de até 0.05% na medição de diâmetros. Este desalinhamento é considerado admissível. Essas franjas, devem estar localizadas a pelo menos 10mm do centro do CCD para que se tenha a resolução necessária para este alinhamento. A figura 6.2 apresenta o padrão de difração para a tolerância de desalinhamento de 2.p.

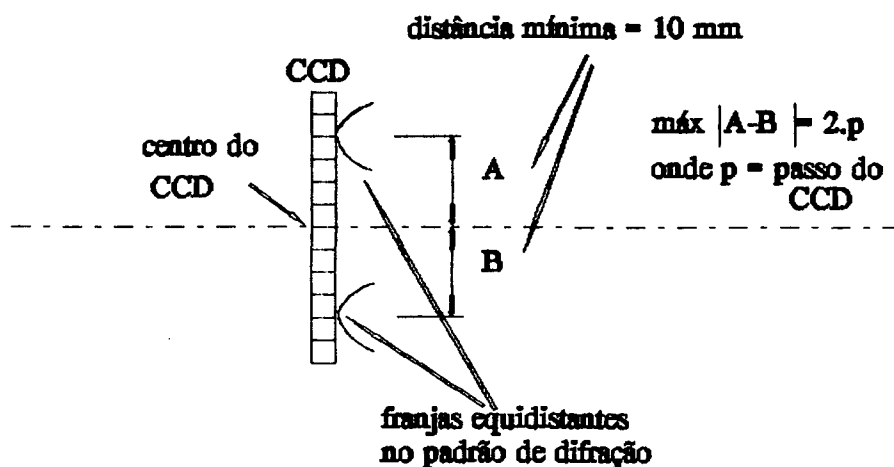


Figura 6.2 – Tolerância do desalinhamento angular entre a lente e o laser no plano ZY.

No plano XY, a posição angular do laser diodo deve ser ajustada de modo que o padrão de difração atinja a região central da linha de pixel do CCD. Esse alinhamento pode ser monitorado através da observação da intensidade do sinal de cada pixel quando o sinal óptico do padrão de difração incide sobre a região central do CCD. Esse alinhamento é realizado quando a intensidade do sinal de cada pixel é máxima.

Movimentos de translação do feixe laser tanto no plano YZ como no plano XZ teoricamente não alteram o padrão de difração. Contudo o deslocamento paralelo do eixo central do feixe do laser em relação ao eixo óptico da lente é recomendado. O perfeito alinhamento desses eixos gera ruídos ópticos no padrão de difração na medição de um pequeno diâmetro causados pelas múltiplas reflexões nas diversas superfícies dos elementos da lente fotográfica, na superfície do fotodetector CCD e na lente de colimação do feixe laser. Testes experimentais mostram que o deslocamento paralelo no plano XZ do eixo central do feixe laser em relação ao eixo focal da lente faz com que os ruídos ópticos, devido às múltiplas reflexões, sejam bastante reduzidos sem a alteração do padrão de difração. Em todos os testes metrológicos discutidos no item 6.2, o protótipo funcional apresenta este desalinhamento mostrado na figura 6.3. Um desalinhamento intensional de 3 mm é usado para se evitar ruídos ópticos sem causar distorção no padrão de difração.

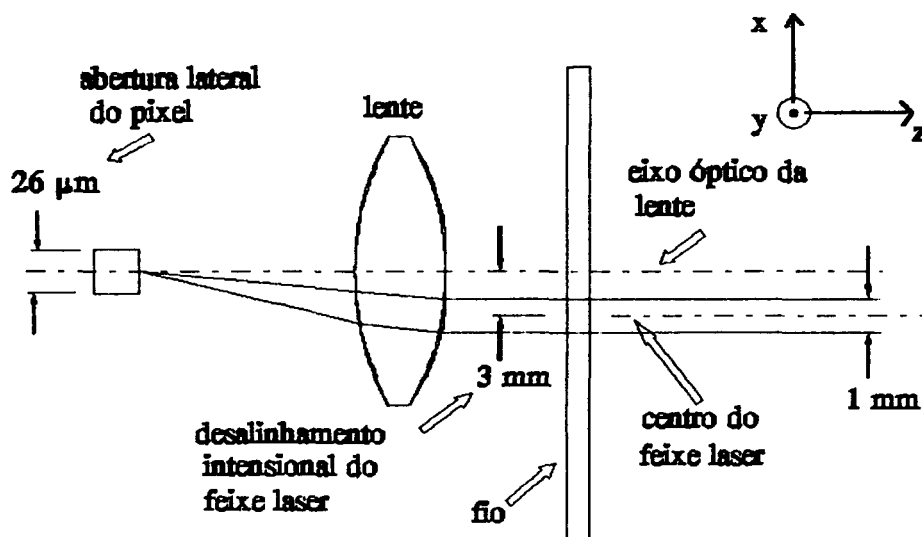


Figura 6.3 – Desalinhamento intensional entre o centro do feixe laser e o eixo óptico no plano ZX.

Um outro artifício deve ser usado para a diminuição dos ruídos ópticos superpostos ao padrão de difração. Um filtro espacial deve ser colocado à frente do laser diodo para a eliminação de feixes secundários, não colimados e indesejáveis gerados pela ótica de colimação. Simples tiras de papel escuro podem ser usadas na confecção desse filtro espacial.

6.1.4 Posicionamento do diâmetro a ser medido na janela de medição

Para a realização dos testes metrológicos estáticos do protótipo funcional, pequenos fios metálicos são usados como padrões para a avaliação do desempenho metrológico do sistema. Os fios metálicos são colocados estaticamente na chamada janela de medição definida tanto pelo feixe colimado de laser como pela distância máxima em relação à lente (fig. 6.4).

Para as lentes fotográficas usadas no protótipo funcional, a distância máxima permitida do afastamento do fio em relação à superfície externa da lente pode ser diferente. Para as lentes de 85, 105 e 135 mm o fio pode estar afastado a 40 mm da superfície da lente sem que as bordas da mesma influenciem no padrão de difração gerado pelo fio. Para a lente de 50 mm, a distância máxima é de aproximadamente 10 mm.

Na aplicação industrial de um sistema de medição que utiliza o princípio estudado neste trabalho, quanto maior a distância entre o fio e a superfície da lente melhor será o desempenho do sistema pois a lente, elemento óptico sensível a sujeira e frágil, estará mais afastado do processo de fabricação do fio e portanto menos susceptível ao ambiente industrial agressivo.

No protótipo funcional, o fio é colocado na janela de medição respeitando-se o afastamento máximo permitido por cada lente e na região central do feixe colimado. O posicionamento central do feixe pode ser controlado através da monitoração da máxima intensidade do padrão difração detectado pelo CCD. A figura 6.4 apresenta a disposição do fio na janela de medição para a realização dos testes metrológicos estáticos.

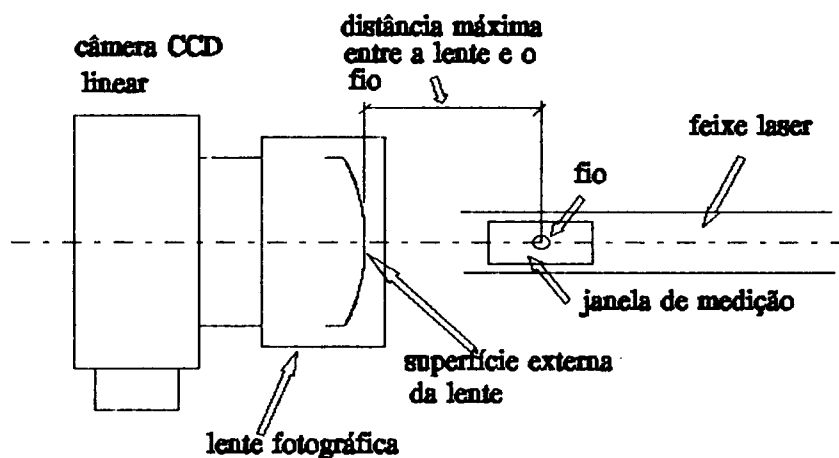


Figura 6.4 - Distância máxima entre o fio medido e a lente.

O alinhamento angular do fio em relação ao feixe laser é também importante pois, como já foi mencionado no capítulo 5, uma câmera cujo CCD tem pequena abertura lateral do pixel é usada no protótipo. A posição angular do fio no plano XZ e XY deve ser ajustada para que o sinal do padrão de difração detectado pelo CCD tenha máxima intensidade. O uso de um CCD com abertura lateral maior reduziria as tolerâncias de posicionamento angular do fio na janela de medição.

6.1.5 Ajuste iniciais da placa de processamento

Alguns parâmetros da placa de processamento usada no protótipo funcional devem ser ajustados para a aquisição do padrão de difração. O primeiro parâmetro a ser ajustado é a frequência de varredura do CCD que determina o tempo de integração no qual cada pixel adquire o sinal de irradiância do padrão de difração. No protótipo funcional, para uma potência do laser de 4.25 mW, a frequência de varredura usada é de 1000 Hz. A essa frequência, o sinal detectado pelos 2048 pixels é adquirido pela placa a cada 1 milésimo de segundo. Este é o tempo de integração usado por cada pixel. O procedimento de ajuste da frequência de varredura é apresentado no manual de operação da placa de processamento /61/.

Outros ajustes são necessários para a correta aquisição do sinal da câmera. Como o sinal dos pixels pares são adquiridos por circuitos eletrônicos diferentes dos ímpares, os níveis desses sinais devem ser ajustados antes de serem multiplexados pois estes níveis devem ser iguais. O manual de operação da placa de processamento também descreve este procedimento de ajuste /61/.

Um dos ajustes mais importante é o ajuste do valor da tensão de referência do conversor A/D na placa de processamento /61/. Através desse ajuste a resolução na digitalização do sinal de cada pixel pode ser melhorada. Com isso a determinação da posição de um mínimo de uma franja é facilitada pois a posição de seu mínimo fica mais fácil de ser observada e medida. Um número maior de pixel se apresentará saturado quando se aumenta a tensão de referência do conversor A/D, mas os mínimos das franjas de interesse no processamento estático de medição podem ser medidos com maior facilidade.

O nível da tensão de referência é determinado quando se realiza o processo estático de medição, descrito no capítulo 3, levando-se em conta a observação das franjas de interesse. Uma vez determinado esse nível, este não será alterado quando realizado o processo dinâmico de medição pois apenas haverá variações mínimas da posição e intensidade das franjas de interesse.

Em todos os testes metrológicos e operacionais apresentados neste capítulo, os valores da tensão de referência do A/D foram determinados em medições prévias do diâmetro para destacar as franjas de interesse. A figura 6.5 apresenta um sinal típico do padrão de difração adquirido e digitalizado pela placa de processamento. No gráfico A a tensão de referência do A/D é mínima e no gráfico B esta tensão é aumentada para destacar a franja de interesse. Este ajuste é feito através de software que acompanha a placa de processamento /61/.

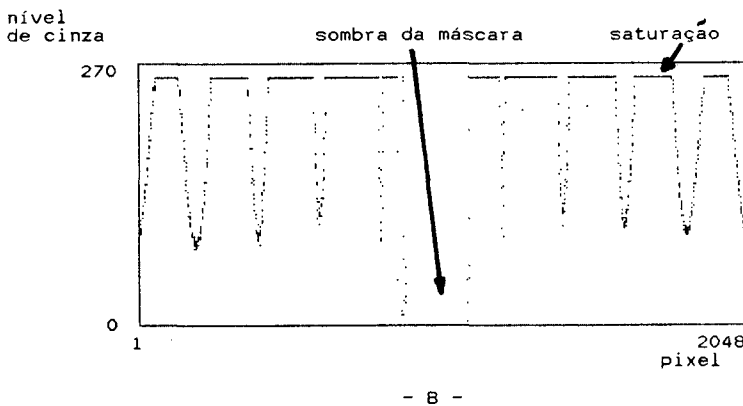
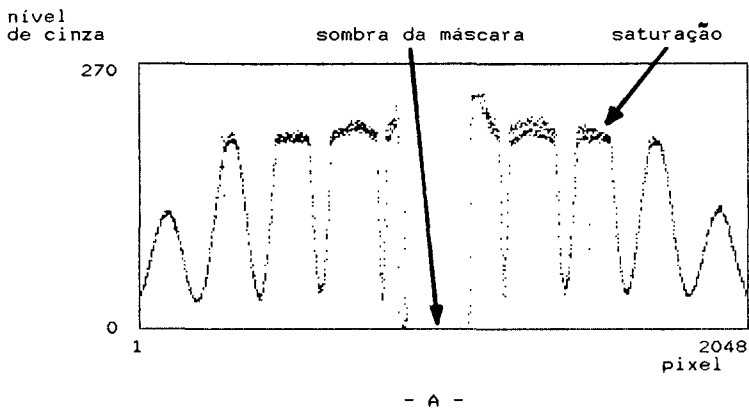


Figura 6.5 - Influência da tensão de referência do A/D sobre o sinal do padrão de difração digitalizado em níveis de cinza. $V_{ref B} > V_{ref A}$.

6.1.6 Ajuste no algoritmo de processamento

O último ajuste necessário para que o protótipo funcional esteja adequado à medição de pequenos diâmetros é o ajuste do nível de referência, a ser aplicado sobre a franja de interesse, para a interpolação de uma parábola e determinação de seu mínimo. Este procedimento é importante no processamento estático de medição. No processamento dinâmico esse nível determina o número de pixels que detectam o vale de uma franja.

O nível de referência deve ser ajustado sobre a franja de forma que esta esteja bem definida e simétrica. Com isso o vale pode ser aproximado a uma parábola. Uma parábola pode ser aproximada pelo método dos mínimos quadrados e seu vértice pode ser determinado facilmente. É importante que esta referência esteja abaixo do centro de uma franja para que a assimetria do perfil de irradiância do padrão de difração não interfira na medição da posição do mínimo da franja. A figura 6.6 apresenta o ajuste da referência para a medição do mínimo de franja. Uma vez determinada essa referência, esta é armazenada em memória e utilizada pelo programa de medição do pequeno diâmetro.

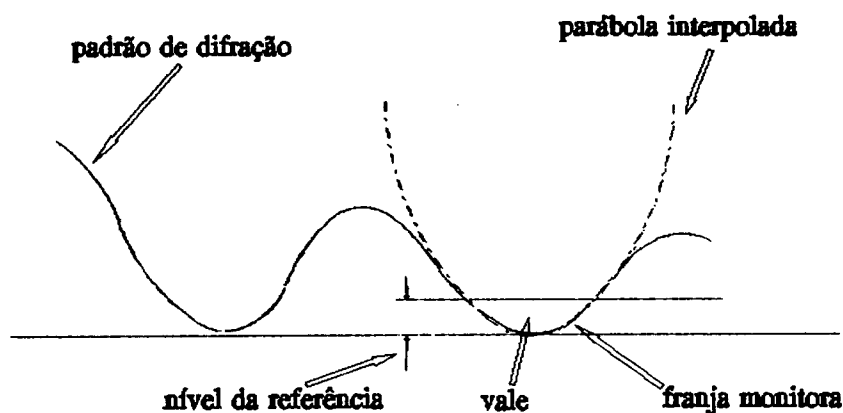


Figura 6.6 - Ajuste do nível de referência para a interpolação de uma parábola sobre a franja de interferência.

6.2 Testes metrológicos

6.2.1 Ensaaios estáticos

A principal característica dos ensaios estáticos é que durante o processo de medição o valor do diâmetro na janela de medição não é alterado. O fio é fixado na janela de medição através de dispositivo mecânico e durante o processo de medição sua posição não é alterada.

O objetivo desse ensaio é a avaliação metrológica do princípio de medição adotado no protótipo funcional e também a avaliação do comportamento do sistema de medição com o uso de diferentes lentes fotográficas. O desempenho metrológico é avaliado através de calibrações realizadas em laboratório usando-se arames padrões. Tais padrões são descritos no item que se segue.

6.2.2 Padrões

Considerando-se as metas na figura 2.21 do capítulo 2, a incerteza de medição pretendida ao medidor de pequenos diâmetros é de no máximo 0.5%. Tal valor foi considerado no projeto do protótipo funcional. Para se avaliar metrologicamente esse protótipo, é recomendável então que os padrões de diâmetro tenham no máximo 0.05% de incerteza dimensional. A faixa de medição a ser avaliada está definida entre 10 e 350 μm .

O requisito de 0.05% de incerteza do padrão de diâmetro é extremamente difícil de ser alcançado para diâmetros menores que 150 μm . Vários trabalhos técnico-científicos têm sido apresentados no sentido do desenvolvimento de medidores de pequenos diâmetros de altíssima precisão para uso em laboratório utilizando-se o próprio princípio da difração, contudo sem lente /15/ e /16/.

Mesmos os melhores resultados apresentados nos trabalhos citados, a incerteza do sistema de medição de pequenos fios metálicos é de aproximadamente $\pm 0.04 \mu\text{m}$ para diâmetros entre 20 e 200 μm . Esta incerteza de medição para o diâmetro de 20 μm corresponde a 0.2% que é maior do que o valor recomendado de 0.05% para o padrão de diâmetro para avaliação do protótipo funcional desenvolvido.

Fica evidente então, que existem dificuldades para a obtenção de um padrão de diâmetro adequado para a calibração do protótipo funcional principalmente para a medição de diâmetros menores que 100 μm .

Além da dificuldade de se medir diâmetros menores que 100 μm com incerteza relativa de 0.05%, a fabricação desses diâmetros com excelente acabamento superficial e com pequenos erros de forma é também extremamente difícil. Fabricantes de arames padrão atualmente se dedicam à fabricação de arames com diâmetros maiores que 90 μm . Esses arames padrão são de aço inox.

A necessidade de padrões de diâmetro adequados à calibração do protótipo funcional é ainda motivo de estudos, pois mesmo recentes trabalhos publicados sobre o assunto ainda não alcançaram os resultados considerados satisfatórios para uso neste trabalho. Contudo, devido a necessidade de se avaliar metrologicamente o protótipo funcional, principalmente para diâmetros menores que 100 μm , buscou-se o aproveitamento máximo de toda infraestrutura laboratorial disponível utilizando-se de arames padrões de referência e um micrômetro de alta precisão recentemente desenvolvido pelo NIST (National Institute of Standards and Technology), onde este trabalho foi desenvolvido. A seguir são discutidos os arames padrões usados e o micrômetro de alta precisão usado na medição dos mesmos:

a) Arames padrão

Os arames padrão utilizados nos ensaios do protótipo funcional pertencem ao conjunto de arames padrão de referência do NIST (antigo NBS). O diâmetro de cada arame é conhecido com uma incerteza de $\pm 0.1 \mu\text{m}$, sendo parte dessa incerteza devido ao erro do micrômetro de alta precisão (descrito abaixo) e parte devido aos erros de forma dos arames. O menor diâmetro disponível é de aproximadamente 95 μm . Diâmetros de aproximadamente 95 até 350 μm foram usados nos ensaios.

Para a avaliação metrológica do protótipo funcional, outros fios de pequenos diâmetros foram usados. Foram adquiridos fios finos metálicos (aço inox e tungstênio) de aproximadamente 12, 25 e 50 μm que foram calibrados pelo micrômetro de alta precisão. Devido ao fato de serem fios de produção contínua, a qualidade superficial e geométrica desses é inferior aos dos arames padrão. As incertezas na medição dos diâmetros desses fios são maiores pois os erros de forma são maiores. Uma série de medições foram realizadas para cada fio rotacionando-o em torno de seu eixo. As incertezas na determinação de seus diâmetros incluem os erros do micrômetro mais as variações de diâmetro devido aos erros de forma. Foram determinados os seguintes valores:

$$d = 12.7 \pm 0.2 \mu\text{m} \text{ (tungstênio)}$$

$$d = 25.2 \pm 0.2 \mu\text{m} \text{ (aço inox)}$$

$$d = 50.8 \pm 0.2 \mu\text{m} \text{ (tungstênio)}$$

b) Micrômetro de alta precisão e fios calibrados

O micrômetro de alta precisão desenvolvido pelo NIST está esquematizado na figura 6.7. Um laser interferométrico é usado para a medição do deslocamento do apalpador. Uma guia aerostática de alta precisão é utilizada na movimentação do apalpador. O processo de medição é feito através de contato mecânico. O arame é colocado entre um apalpador fixo de forma cilíndrica e outro apalpador móvel de forma plana. Um retrorefletor move-se junto com o apalpador plano. Um interferômetro é fixo na guia e o deslocamento do apalpador móvel é medido.

A resolução do sistema é igual à resolução do laser interferométrico que é de 0.01 μm . Através de análise de erros e alguns testes de calibração, a incerteza de medição estimada do micrômetro é de $\pm 0.08 \mu\text{m}$. O protótipo desse micrômetro ainda se encontra em fase de estudos e melhoramentos.

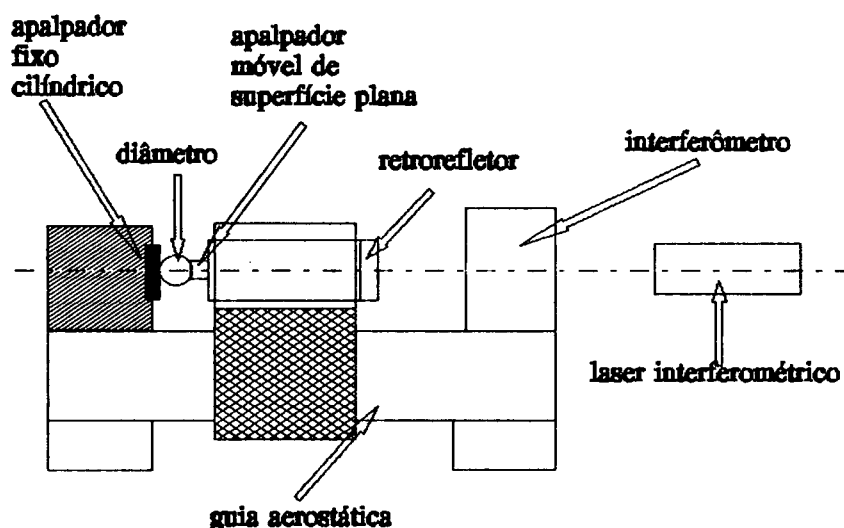


Figura 6.7 - Esquema do micrômetro de alta precisão do NIST.

Os apalpadores cilíndrico e plano são usados para reduzir os erros de alinhamento entre os apalpadores e também entre o diâmetro a ser medido e os apalpadores. Durante o processo de medição, o diâmetro é determinado pela distância entre o ponto definido pelo contato do diâmetro/apalpador cilíndrico e a linha definida entre o diâmetro/apalpador plano.

Quando um cilindro é medido pelo protótipo funcional desenvolvido neste trabalho, o diâmetro é medido pela difração causada em uma região extensa definida pela espessura do feixe laser. Pode-se dizer então que a medição pelo protótipo funcional está relacionada com a medição de um diâmetro médio de uma região do fio. Esta região é definida pela espessura do feixe laser. Já no micrômetro desenvolvido pelo NIST, a medição do diâmetro é localizada pois é dependente de um ponto definido pelo contato mecânico entre o apalpador cilíndrico e o fio. É necessário então que o diâmetro seja medido em várias posições no micrômetro de alta precisão para que se obtenha um valor médio do diâmetro em uma região equivalente àquela medida pelo protótipo funcional.

6.2.3 Procedimentos de ensaio

Como foi mencionado anteriormente, os ensaios estáticos são realizados mantendo-se fixo o fio na janela de medição. Com isso, durante o processo de medição, o diâmetro é constante. Os ensaios estáticos avaliam as características estáticas do sistema de medição desenvolvido.

Vários diâmetros são medidos mantendo-se a mesma lente. Cada arame é medido de acordo com a configuração de ajuste do protótipo funcional descrita no item 6.1. Após todos os arames terem sido medidos, as demais lentes são testadas repetindo-se novamente as medições estáticas de cada arame padrão.

Para cada medição, o processamento matemático para a obtenção do valor do diâmetro é feito considerando a correção de reflexão e sem esta correção. O gráfico de erro sistemático é construído a partir dos resultados desses ensaios.

São avaliados também os erros aleatórios que são causados pelos ruídos ópticos e eletrônicos do protótipo funcional. Os erros aleatórios causados pela variação do fio na janela de medição são avaliados no item 6.3. Os resultados dos testes metrológicos realizados são analisados a seguir.

6.2.4 Resultados da calibração

Os principais resultados dos testes metrológicos estáticos do protótipo funcional são apresentados na figura 6.8 e 6.9. Os erros sistemáticos na medição dos arames padrão são apresentados para cada lente usada no protótipo funcional.

As incertezas de medição dos arames padrão também são apresentadas. A figura 6.9 apresenta os erros sistemáticos após a aplicação das equações matemáticas de correção do efeito da reflexão apresentadas no capítulo 3. Na medição dos diâmetros nas figuras 6.8 e 6.9 os valores das distâncias focais usadas nas equações do processamento matemático são as distâncias nominais apresentadas nos catálogos das lentes fotográficas fornecidos pelo fabricante /60/.

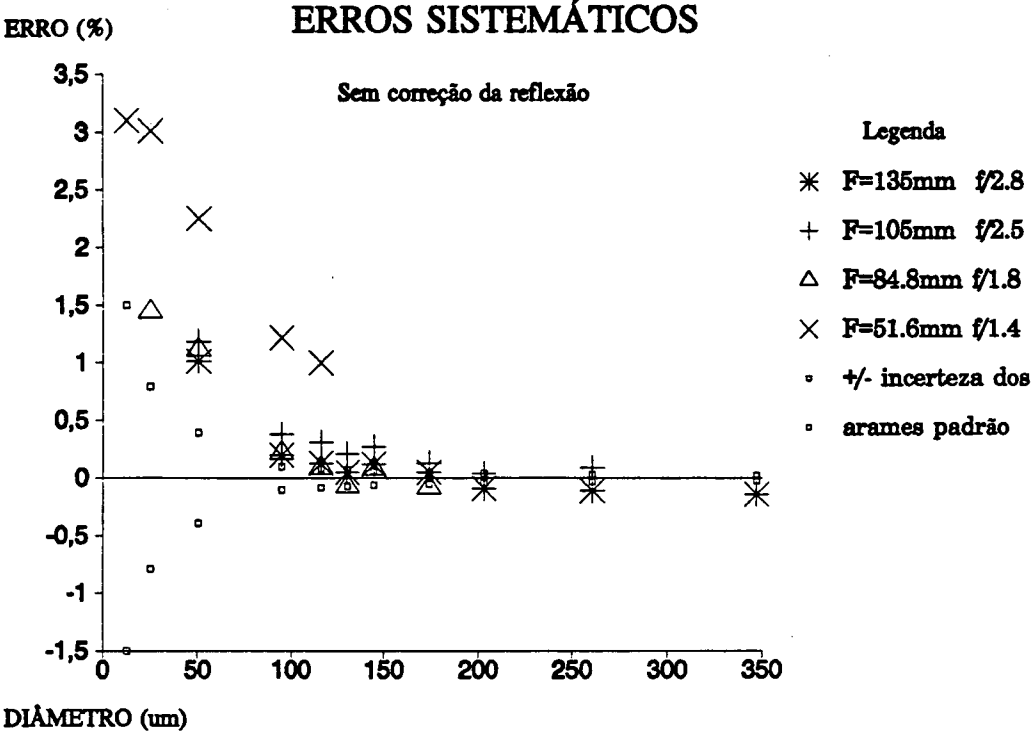


Figura 6.8 - Resultados de calibrações estáticas sem correção de reflexão.

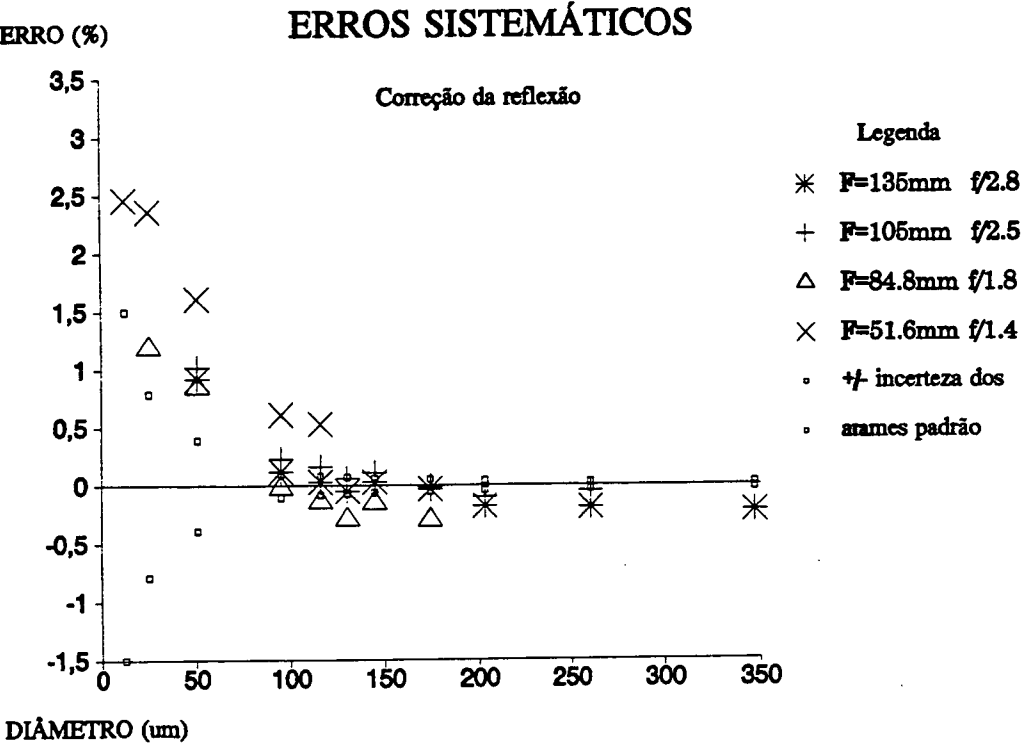


Figura 6.9 - Resultados de calibrações estáticas com correção de reflexão.

6.2.5 Análise dos resultados da calibração

Observa-se nos gráficos das figuras 6.8 e 6.9 um aumento crescente no erro sistemático na medição de diâmetros menores que 100 μm acima de 0.5%. Pode-se observar também que a incerteza na medição dos arames padrão também aumenta com a diminuição de seus diâmetros mas a uma razão de crescimento menor que a observada dos erros sistemáticos.

Como já foi discutido no capítulo 4, na análise de erros, um pequeno erro no valor da distância focal tem uma grande influência sobre os erros sistemáticos na medição dos pequenos diâmetros. Erros sistemáticos podem estar influenciando na medição de um mesmo diâmetro por diferentes lentes, pois os valores de foco são adotados a partir de catálogos e não foram medidos neste trabalho.

Outras fontes de erros também têm influência sobre os resultados alcançados. Com a diminuição do diâmetro, a razão entre a dimensão do fio e o comprimento de onda também diminui. Quanto menor essa razão, menor é a precisão do modelo matemático usado para o cálculo do diâmetro medido /44/.

Outras observações devem ser feitas quanto ao padrão de difração adquirido pela câmera CCD para diferentes diâmetros e lentes. A figura 6.10 mostra o sinal adquirido pela câmera CCD usando-se a lente de 105 mm de foco e medindo-se vários diâmetros diferentes. As condições de ajuste de todo o sistema de medição são mantidas constantes. Observa-se que com o aumento do diâmetro também há um aumento do nível médio de irradiância detectado por cada pixel da câmera.

O aumento do diâmetro provoca um aumento da contribuição dos feixes refletidos na superfície do fio sobre o padrão de difração /57/, /59/. Além disso existe uma perda de coerência espacial na geração das ondas de difração sobre as bordas do fio que estão mais afastadas uma da outra e portanto sendo atingidas por raios de laser pertencentes a regiões mais periféricas do feixe colimado do laser diodo /46/. A combinação desses dois efeitos provocam um aumento do nível médio de irradiância incidente sobre a câmera. Apesar disso, os erros sistemáticos diminuem com o aumento do diâmetro significando que os raios refletidos e a perda de coerência espacial têm pequena influência sobre os erros sistemáticos na medição de pequenos diâmetros quando se varia o diâmetro e não se altera a lente.

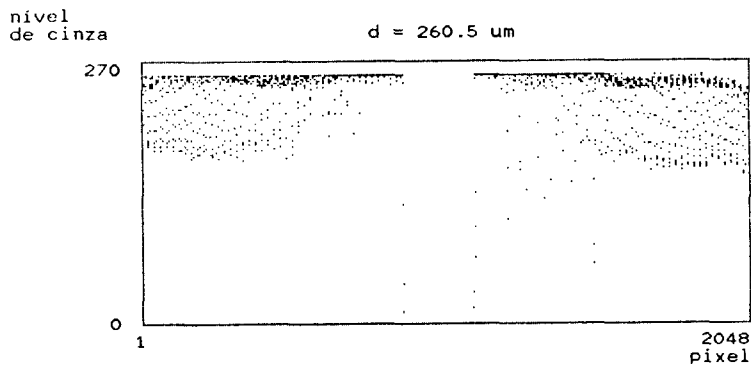
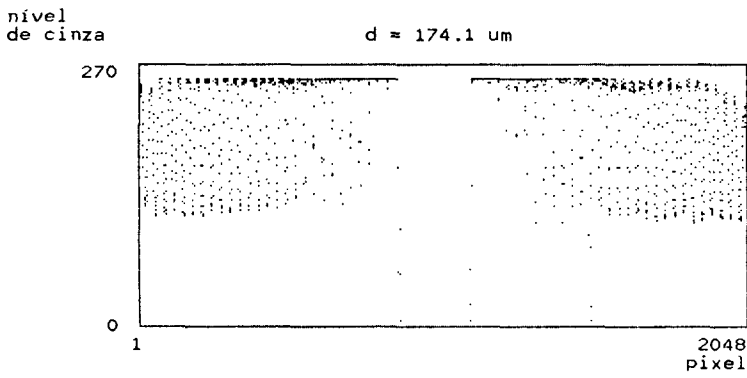
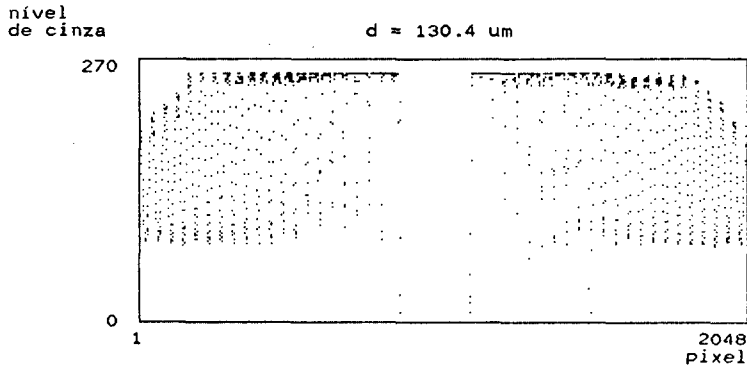


Figura 6.10 - Sinal digitalizado do padrão de difração para lente de foco $f=105 \text{ mm}$ medindo-se diâmetros de 130.4 ; 174.1 e $260.5 \text{ } \mu\text{m}$.

A figura 6.11 apresenta o sinal digitalizado do padrão de difração simulado e experimental usando-se a lente de 85 mm. O modelo simulado não considera efeitos de reflexão e perda de coerência espacial sobre o padrão de difração. O padrão de difração simulado considera o diâmetro médio do arame padrão medido. Além disso, o modelo computacional é corrigido para que os valores de irradiância sejam compatíveis com os valores medidos experimentalmente. A amplitude do sinal de cada pixel é reduzido de 40 % no modelo pois este considera que o perfil de irradiância sobre o pixel é constante e igual ao valor máximo de irradiância no feixe laser.

Nos gráficos da figura 6.11 observa-se por simulação que a resolução espacial do CCD, ou seja, o passo entre pixels, é suficiente para a detecção de uma franja do padrão de difração e portanto não está acontecendo o fenômeno chamado "aliasing". A perda do contraste das franjas é devido a contribuição, sobre o sinal de difração, da reflexão e à diminuição da coerência espacial das ondas de difração.

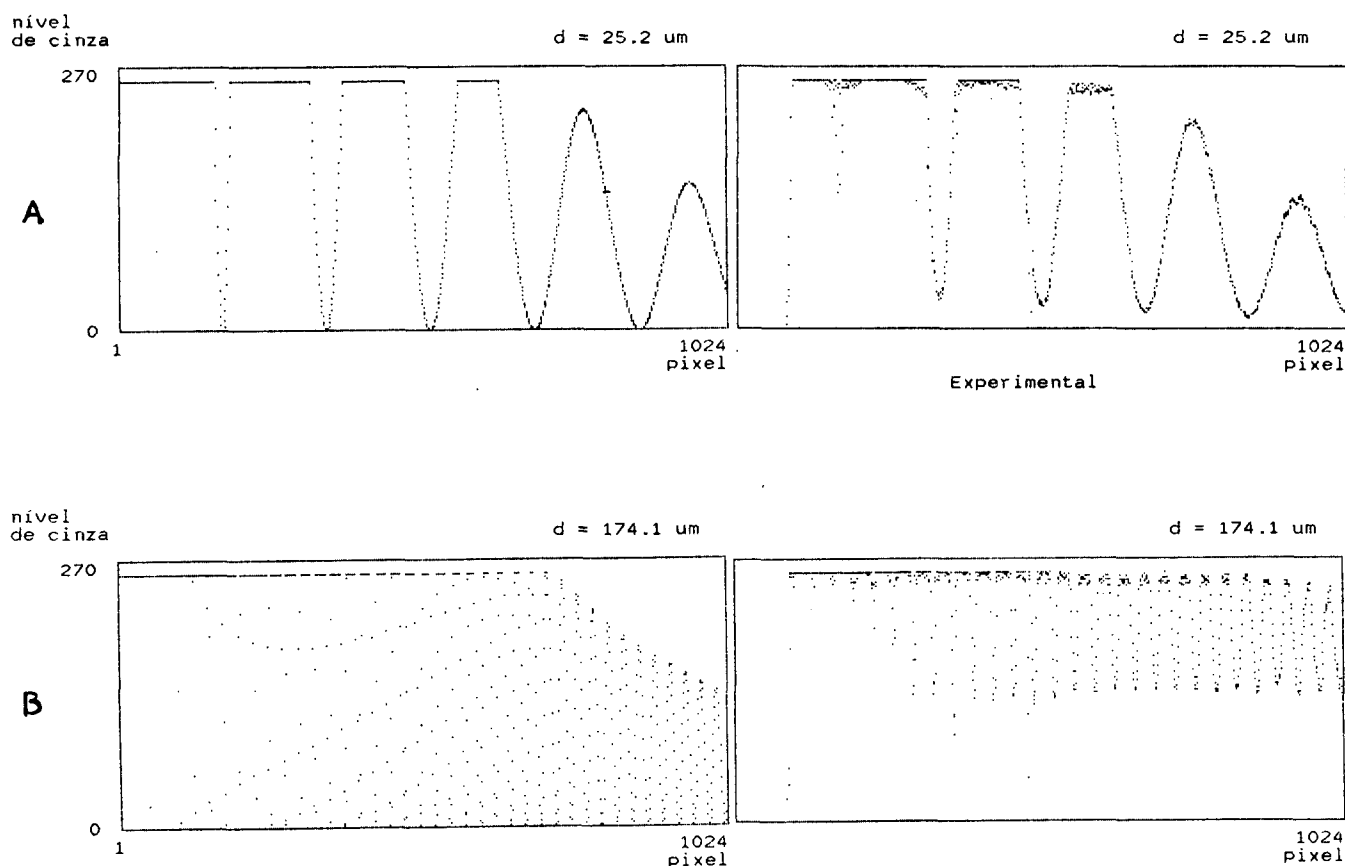


Figura 6.11 - Sinais digitalizados do padrão de difração para a lente de 85 mm. Gráfico A - $d=25.2 \mu\text{m}$; Gráfico B - $d=174.1 \mu\text{m}$.

O aumento do nível médio do sinal com o aumento do diâmetro impõe uma restrição sobre a versatilidade do protótipo funcional, pois existe a necessidade de se ajustar os níveis de referência para a determinação da posição da franja para cada diâmetro diferente. Este ajuste foi discutido no item 6.1.6 deste capítulo e não representa limitações à versatilidade do protótipo funcional se este for aplicado na medição de fios em processos semi-contínuos onde as variações de diâmetro a serem medidas são pequenas e não há necessidade do ajuste do nível de referência. No processo semi-contínuo uma grande quantidade de um mesmo fio é produzida.

Uma outra característica do protótipo funcional deve ser discutida quanto à medição de um mesmo diâmetro com várias lentes diferentes. A diminuição do foco significa que, para o mesmo comprimento do CCD, feixes difratados em ângulos maiores podem ser observados. A figura 6.12 apresenta resultados experimentais da medição de um mesmo diâmetro utilizando-se duas lentes de focos diferentes. Observa-se também nesta figura que há um aumento do nível médio do sinal de difração com a diminuição do foco da lente. O aumento do ângulo de observação das franjas de difração favorece a um aumento da perturbação dos feixes refletidos sobre a superfície do padrão de difração /49/. Outro fator de influência no aumento do nível médio do sinal do padrão de difração é o aumento da irradiância do padrão de difração sobre a superfície do CCD com a diminuição do foco. A irradiância é proporcional a $1/\lambda^2 f^2$ /44/. Se f diminui, a irradiância aumenta na razão inversa do quadrado do foco. A combinação dos dois efeitos descritos acima provocam o aumento do nível médio do sinal de difração.

A figura 6.9 apresenta os resultados dos erros sistemáticos após a correção da influência da reflexão. Comparando-se com o gráfico da figura 6.8, nota-se que para ângulos maiores de observação do padrão de difração, usando-se lentes com focos menores, a correção é maior. O efeito da reflexão provoca um aumento no valor medido quando se usa o modelo sem a correção da reflexão. O modelo de correção sempre diminui o valor do diâmetro obtido pelo modelo matemático da difração de Fraunhofer.

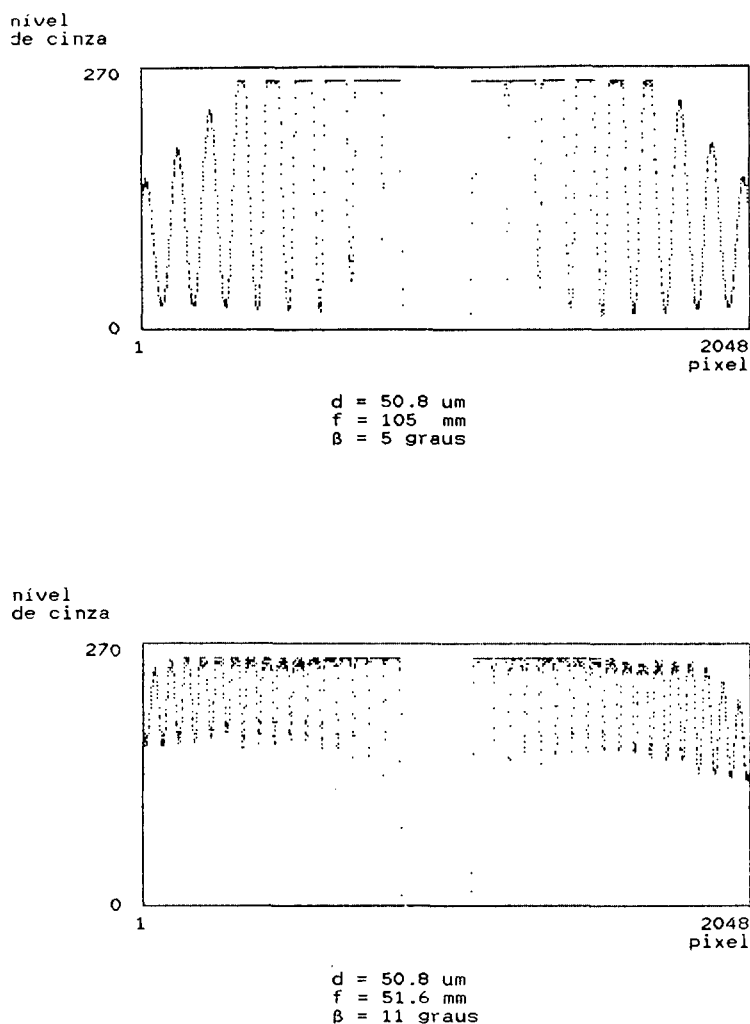


Figura 6.12 – Sinais digitalizados do padrão de difração para o mesmo diâmetro e lentes diferentes.

Em todas as medições realizadas, as franjas monitoradas para a medição do diâmetro se localizam, no mínimo, a 10 mm do centro do fotodetector CCD para se ter a resolução de medição desejada, como foi discutido no capítulo 4. Medições de fios maiores ou com lentes com foco menor produzem um número maior de franjas sobre o CCD, o que significa que a frequência espacial das franjas do padrão de difração é maior. Duas franjas consecutivas e distantes mais do que 10 mm do centro do CCD podem ser monitoradas para a medição do diâmetro e testes experimentais mostram que pode haver uma variação de até 0.1% na medição do diâmetro dependendo da da posição da franja monitorada.

Os resultados dos testes metrológicos estáticos mostrados nas figuras 6.8 e 6.9 são relativos à medição da posição das franjas do padrão de difração utilizando-se a interpolação de uma parábola no vale de uma franja. A posição da franja é determinada pelo cálculo do mínimo da parábola. Utilizando-se o método da referência, explicado no capítulo 5, erros da ordem de 0.05% podem ser incluídos na medição dos pequenos diâmetros.

Os testes metrológicos também permitiram uma avaliação do desempenho do protótipo funcional quanto ao comportamento do sistema em relação aos ruídos ópticos e eletrônicos gerados pelos seus próprios componentes, ou seja, pelo laser, câmera e placa de processamento. Mantendo-se fixo o arame padrão na janela de medição e realizando-se várias medidas do seu diâmetro, observou-se uma dispersão dos resultados de medição muito pequena na ordem de 0.005%, indicando que esses ruídos têm desprezível influência sobre o sistema de medição.

Erros causados por aberrações ópticas não foram avaliados. Esses erros estão embutidos nos resultados apresentados na figura 6.8 e 6.9 e suas influências são sistemáticas, significando que podem ser eliminadas através de calibrações.

6.3 Testes operacionais

Por se ter um protótipo funcional em uma bancada de laboratório não se realizou ensaios de avaliação do desempenho metrológico e operacional do sistema em diferentes condições de vibração, temperatura etc.

Como no protótipo funcional utiliza-se uma câmera industrial linear comercial, espera-se que o seu funcionamento seja satisfatório também em ambiente hostil. Quanto ao laser, este é extremamente sensível às variações de temperatura. O comprimento de onda varia com a temperatura. Duas soluções podem ser adotadas para que o protótipo seja menos sensível à variações de temperatura, ou se usa um laser com elemento Peltier para o controle de sua temperatura externa /63/ ou se compensa variações de λ por software monitorando-se a temperatura ambiente. Nenhuma dessas técnicas foi implementada pois todos os testes realizados foram feitos em laboratório com ambiente controlado.

Por se tratar ainda de um protótipo funcional e não de um protótipo industrial, o único teste operacional do sistema realizado é o de avaliação do seu comportamento metrológico quando o fio é colocado em diferentes posições dentro da janela de medição. Tal teste simula as vibrações do fio a ser medido durante seu processo de fabricação.

6.3.1 Vibrações do fio no campo de medição

Como já foi mencionado anteriormente, apenas o processo estático de medição foi implementado no protótipo funcional. As medições realizadas em diferentes posições na janela de medição também foram realizadas de forma estática, ou seja o diâmetro não se movia durante o processo de medição.

Variações na posição do fio dentro da janela de medição geram erros de medição pois o fio se move em relação ao feixe laser, sendo atingido por frentes de onda que possuem distorções e variações de irradiância. Movimentos do fio no sentido da propagação do feixe laser fazem com que os feixes difratados se propaguem por regiões diferentes da lente onde as aberrações ópticas podem ser diferentes.

Além dos movimentos de translação, o fio pode vibrar angularmente em relação ao feixe laser. Os efeitos desses movimentos já foram discutidos no capítulo 4. O movimento angular do fio provoca a variação da posição e forma do padrão de difração detectado pelo CCD. Com isso há uma diminuição do perfil de irradiância detectado pelo CCD linear. Esses movimentos angulares devem ser limitados de forma que o padrão de difração ainda seja detectado pelo CCD.

Para se avaliar o comportamento do protótipo funcional devido aos movimentos do fio foram usadas mesas micrométricas de deslocamento linear e angular para o posicionamento desejado. Os ensaios foram realizados na medição de um arame padrão de aproximadamente 130 μm e o protótipo funcional com a lente de 105 mm.

A avaliação do protótipo quanto às vibrações do fio está intimamente ligada com a avaliação do sistema de medição nas condições dinâmicas de operação, pois em condição real de operação, o fio vibra e o processo de medição deve ser rápido de forma que o sistema detecta o padrão de difração do fio em diferentes posições na janela de medição. Nos ensaios apresentados a seguir a taxa de medição é 1000 Hz e o método de processamento dinâmico é usado no cálculo do diâmetro.

6.3.2 Análise de resultados

Devido às limitações da largura do feixe laser e da abertura lateral do fotodetector CCD as posições do fio na janela de medição são limitadas. A figura 6.13 apresenta a janela de medição e as referências usadas.

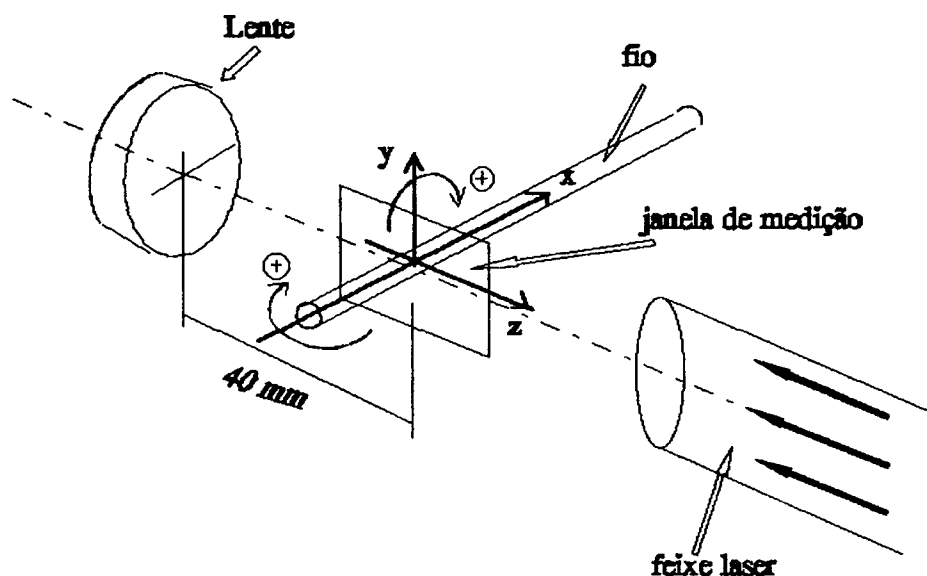


Figura 6.13 – Janela de medição com as referências adotadas nos testes operacionais.

As posições angulares e lineares apresentadas são as posições limites onde o sistema ainda é capaz de medir normalmente sem a necessidade de ajustes complementares. As variações do resultado de medição do diâmetro Δd , quando o arame padrão é colocado em uma nova posição a partir da posição zero (posição no centro do feixe), são mostradas a seguir para cada posição ensaiada:

- + 0.5 mm no eixo Y ; $\Delta d = 0.06\%$
- 0.5 mm no eixo Y ; $\Delta d = 0.06\%$
- + 1 mm no eixo Z ; $\Delta d = - 0.06\%$
- 1 mm no eixo Z ; $\Delta d = 0\%$
- + 1° no plano ZX ; $\Delta d = 0.06\%$
- 1° no plano ZX ; $\Delta d = 0.06\%$
- + 0.15° no plano XY ; $\Delta d = 0.06\%$
- 0.15° no plano XY ; $\Delta d = 0\%$

Considerando-se que estes erros são estaticamente independentes, a soma quadrática pode ser usada para uma melhor avaliação da influência de todos os erros. A soma quadrática é considerada como o erro máximo provável.

O resultado da soma quadrática se aproxima a $\pm 0.2\%$. Este valor pode ser considerado como uma estimativa do erro aleatório do protótipo funcional devido à vibração do fio na janela de medição. Estes testes de avaliação do sistema devem ser realizados novamente após a implementação de hardware do processo dinâmico de medição para melhor avaliação dinâmica do sistema de medição de pequenos diâmetros proposto neste trabalho.

6.4 Contabilização dos erros

Como foi mencionado anteriormente, o processo dinâmico de medição deve ser implantado para uma melhor avaliação das características dinâmicas do protótipo funcional desenvolvido. Apesar desse processo não estar implementado, pode-se obter uma estimativa dos erros aleatórios do sistema de medição a partir dos ensaios de repetibilidade realizados tanto com o arame padrão fixo na janela de medição como movendo-se este por diversas regiões da janela de medição. A dispersão de medição estimada gerada pelo protótipo funcional, considerando ainda os demais erros do processo de medição dinâmico, é de $\pm 0.25\%$ em toda a faixa de medição de 10 a 350 μm . Influências de lufadas de ar na janela de medição, presença de pó, variações de temperatura, vibrações mecânicas e ruídos eletro-eletrônicos sobre o protótipo funcional não estão sendo considerados nesta estimativa.

Quanto aos erros sistemáticos, para os diâmetros padrões acima de 90 μm , o protótipo funcional apresenta erros sistemáticos dentro da faixa de $\pm 0.25\%$ quando se usa o algoritmo de correção de reflexão e as lentes de 85, 105 e 135mm de distância focal (fig 6.9). Os resultados obtidos com a lente de 50 mm apresentam um erro sistemático maior que pode ser causado por um erro no valor da distância focal maior em relação às demais lentes. As aberrações das lentes não são conhecidas.

A avaliação exata dos erros sistemáticos do protótipo funcional para os diâmetros menores que 90 μm é prejudicada pelo aumento considerável da incerteza de medição dos arames padrões. No entanto, nota-se que existe um aumento dos erros sistemáticos com a diminuição do diâmetro a uma razão maior do que o aumento das incertezas dos padrões. Em relação aos valores médios do diâmetro do padrão, observa-se erro sistemático de até 2.5% na medição de um fio de 12.7 μm o que corresponde a aproximadamente 0.3 μm de erro sistemático, quando se usa o algoritmo de correção da reflexão (fig 6.9).

Nota-se que para cada lente existe uma tendência de aumento dos erros sistemáticos com a diminuição do diâmetro. Tais erros podem ser eliminados através de calibrações. A eficiência dessas calibrações está limitada ao valor das incertezas de medição dos padrões dos diâmetros menores que 90 μm .

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O sistema de medição proposto neste trabalho é adequado à medição de pequenos fios metálicos com diâmetro entre 10 a 350 μm . Nas condições testadas, a incerteza de medição alcançada para diâmetros maiores que 90 μm é menor que $\pm 0.5\%$, o que significa que as metas metrológicas estabelecidas, em função das necessidades industriais para esses diâmetros, foram atingidas.

Para diâmetros menores, calibrações devem ser realizadas para a redução dos erros sistemáticos. A eficácia destas calibrações está vinculada à disponibilidade de padrões de diâmetro com as incertezas de medição adequadas, $< 0.1\%$, para que o objetivo de incerteza de medição do sistema de medição de pequenos diâmetros, menores que 90 μm , seja atingido. A dispersão de medição estimada para toda a faixa de medição é de aproximadamente $\pm 0.25\%$.

Os fios metálicos a serem medidos por este sistema devem ter boa qualidade dimensional e superficial de forma que não possuam grandes variações de dimensão ao longo do trecho de seu comprimento exposto ao feixe de laser, o que é uma característica típica dos fios normalmente fabricados. Se a superfície do fio metálico apresentar grandes variações de dimensão em uma região de comprimento menor ou igual à espessura do feixe laser, cerca de 1 mm, o que só é encontrado em fios de baixíssima qualidade, o padrão de difração gerado apresentará distorções, o que prejudica a medição do diâmetro do fio.

O protótipo do sistema de medição de pequenos diâmetros de fios metálicos construído funciona em uma bancada de testes de laboratório. Alguns dos diferentes componentes usados pelo sistema, como o laser diodo, lentes fotográficas e câmera linear CCD industrial, são facilmente adquiridos no mercado. O protótipo resultou em um sistema de medição compacto.

O laser diodo usado, disponível comercialmente, mostra-se adequado ao sistema de medição pela sua robustez e qualidade óptica de seu feixe. Existem limitações quanto à sua aplicação em ambientes com grandes variações de temperatura. Melhoramentos na colimação do feixe laser podem aumentar as dimensões da janela de medição através do aumento da largura do campo colimado de feixe laser. Sendo assim, os limites permitidos às amplitudes de vibrações mecânicas do fio durante o processo de sua fabricação poderão ser aumentados.

As lentes fotográficas utilizadas no protótipo também se mostram adequadas quanto às suas características ópticas. Contudo, é observado que não é possível medir toda a faixa de medição sem que se troque, pelo menos uma vez, a lente do protótipo do sistema de medição desenvolvido. A substituição por uma lente de foco diferente se faz necessária porque a variação do número de franjas de interferência do padrão de difração geradas por diâmetros de 10 a 350 μm é muito grande e o número de franjas pode ser alterado quando se usa uma lente de foco diferente. Testes experimentais mostram que é recomendável o uso de lentes com foco de 50 ou 85 mm para diâmetros menores que 90 μm e com 105 ou 135 mm para diâmetros maiores que 90 μm . A lente com 135 mm de distância focal mostra-se a mais adequada para a medição de fios entre 200 e 350 μm .

A falta de rigidez da interface mecânica entre as lentes e a câmera industrial apresenta-se como um problema a ser resolvido por um projeto mecânico mais adequado para a aplicação do protótipo em ambientes industriais hostis onde existem vibrações mecânicas. Movimentos relativos entre lente e câmera provocam erros na medição do diâmetro.

A câmera CCD linear utilizada no protótipo mostra-se adequada ao protótipo pela sua compactidade e eficiência na aquisição do padrão de difração gerado pelos pequenos diâmetros expostos ao feixe laser. A pequena abertura lateral dos pixels do fotodetector CCD impõe restrições à vibração angular máxima permitida ao fio na ordem de ± 0.16 grau. O uso de uma câmera cujo CCD possua maior abertura lateral é recomendável. Câmeras com grande abertura lateral do pixel e com bom desempenho operacional, baixos ruídos e alta velocidade de varredura, foram lançadas recentemente no mercado mundial /66/.

A câmera industrial juntamente com a placa de processamento utilizados no protótipo do sistema de medição formam um sistema conhecido como "Machine Vision" que pode ser adquirido facilmente no mercado. Acompanha esse sistema um software pelo qual pode-se programar e acessar diversas funções de processamento em tempo real oferecidas pela placa de processamento. Esse sistema é bastante versátil e de fácil operacionalização. O desenvolvimento de uma placa de processamento específica ao medidor de pequenos diâmetros é recomendável pois o custo do sistema de "Machine Vision" é aumentado pelas inúmeras funções extras de processamento não utilizadas pelo protótipo desenvolvido neste trabalho.

Quanto ao algoritmo de medição de pequenos diâmetros, pode-se afirmar que o uso do método estático para medição do valor absoluto do diâmetro seguida da monitoração da variação do diâmetro, através de um método dinâmico, faz com que o sistema de medição consiga atingir baixas incertezas e ao mesmo tempo aumente sua velocidade de medição. O método dinâmico de medição desenvolvido utiliza funções de processamento em tempo real oferecidas pela placa de processamento e ainda possui uma simplificação matemática que diminui o tempo de processamento. O método dinâmico não foi implementado mas toda a sua metodologia é apresentada neste trabalho. Estima-se que o método dinâmico de medição permite que a velocidade de medição do medidor de pequenos diâmetros alcance a 1000 leituras por segundo.

Alguns estudos e testes complementares, além daqueles já mencionados, são de suma importância ao desenvolvimento de um produto de um instrumento de medição que se utilize do princípio e metodologias apresentadas neste trabalho. O uso de um CCD com maior abertura lateral é vital para a aplicação prática do medidor de pequenos diâmetros na indústria, para que haja um relaxamento nos requisitos de alinhamento de vibração angular do fio. Além disso, o método dinâmico de medição deve ser implementado e testes metrológicos experimentais devem ser realizados para a avaliação das características dinâmicas do sistema de medição.

Testes de avaliação do comportamento do sistema em diferentes condições ambientais e na medição de fios metálicos de diferentes materiais, revestimentos e condições superficiais completam os testes necessários para o melhor conhecimento do desempenho metrológico e operacional do sistema de medição de pequenos fios metálicos proposto neste trabalho.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- /1/ AVITZUR, B. "Handbook of Metal-Forming Process" - Wiley - Interscience Publication - 1983.

- /2/ JONES, B.E "Sensors in Industrial Metrology" - Journal of Physical Engineering : Scientific Instruments, Vol. 20, pg. 1113, 1987.

- /3/ BATHELOP, B.G. "Automated Visual Inspection" - IFS (Publications) Ltda.,
HILL, D.A. UK, 1985.
HODGSON, D.C.

- /4/ DOEBELIN, E.O. "Measurement Systems - Applications and Design" - McGraw-Hill Publishing Company, Fourth Edition, 1990.

- /5/ LÜDGE, W. "A New Method of Non-Contacting Wire Size Measurement"
GÜNTHER, K. - VDI Berichte NR. 761, 1989.
KLOSS, H. G.
HERZ, H.
JÄSCHKE, R.

- /6/ CIELO, P. "Optical inspection in hostile industrial environments:
DUFOUR, M. single-sensor vs. imaging methods" - SPIE Vol. 959,
pag.87, 1988.

- /7/ SMART, A.E. "Trends in optical sensors for hostile environments" - SPIE Vol. 959, pg. 52, 1988.

- /8/ KOBAYASHI, A. "New optical measurements and their applications in industry" - Measurement Vol. 9 No. 2, Apr-Jun, 1991.

- /9/ CIELO, P. "Optical Techniques for Industrial Inspection"- Academic Press, 1988.

- /10/ AHLERS, R. -J. "Electro-optical sensors in industrial applications" - SPIE Vol. 959, pg. 166, 1988.

- /11/ RITCHIE, S. "Proposals for a standard for the safe use of light-emitting diodes, laser diodes, and optical fibre transmission systems" - Optics & Laser Technology Vol.21, No 4, pg. 241, 1989.

- /12/ NIST "Technical Digest Symposium on Optical Fiber Measurements" - NIST Special Publication 792, 1990.

- /13/ YOUNG, M. "Video microscope with submicrometer resolution" -
MECHELS, S. Applied Optics Vol. 30, No. 16, pg. 2202, 1991.

- /14/ O'SULLIVAN, M. "Fizeau fring interferometer for fibre outside diameter measurements" - Northern Telecom, Canada, 1987.

- /15/ XING, X. Z. "High accuracy microdimension measurement system by
LI, M. using laser and CCD" - Measurement Vol. 5, No. 2, Apr-
OZONO, S. Jun, 1987.
KATO, J.
BAI, G. R.
ZHENG, W.

- /16/ VESEL'EV, V. M. "Laser diffraction installation to measure small linear
LIZUNOV, V. D. dimensions" - Izmeritel'naya Tekhnika, No. 2, pg. 19,
ZAGARSKIKH, S. 1990.

- /17/ CIELO, P. "Algorithm for subpixel edge positioning and part sizing
VAUDREUIL, G. under coherent projection" - Optics & Laser Technology
Vol.22, No. 2, pg. 85, 1991.

- /18/ SOOBITSKY, J. A. "Scanning laser diameters gages for industrial use" - SPIE Vol. 959, pg. 193, 1988.

- /19/ DOBOSZ, M. "Statical analysis of a method for monitoring fibre outside diameter using dual beam of edge diode light" - Measurement, Vol. 6, No. 4, pg. 187, Oct - Dec 1988.

- /20/ ASHKIN, A. "Outer diameter measurement of low birefringence optical
DZIEDZIC, J. M. fibers by a new resonant backscatter technique" -
STOLEN, R. H. Applied Optics, Vol. 20, No. 13, pg. 2299, 1981.

- /21/ PODMANICZKY, A. "Micro-interferometric method for relative diameter
BARABÁS, M. measurement of optical fibres" - Measurement Vol. 5, No.
MÁRKUS, A. 3, pg. 135, Jul - Sep 1987.

- /22/ PODMANICZKY, A. "Diameter measurement of optical fibers and wires by
laser" - SPIE Vol. 398, pg. 274, 1983.

- /23/ SMITHGALL, D. H. "High-speed noncontact fiber-diameter measurement using
WATKINS, L. S. forward light scattering" - Applied Optics, Vol. 16, No.
FRAZEE, R. E. 9, pg. 2395, 1977.

- /24/ FEJER, M. M. "High-speed high-resolution fiber diameter variation
MAGEL, G. A. measurement system" - Applied Optics, Vol. 24, No. 15,
BYER, R. L. pg. 2362, 1985.

- /25/ ABUSHAGUR, M. "Measurement of optical fiber diameter using the fast
GEORGE, N. Fourier transform" - Applied Optics, Vol. 19, No. 12, pg.
2031, 1980.

- /26/ TARGET SYSTEMS "Dimensional measurement and control systems" - Catálogo
comercial.

- /27/ KEYENCE CORP. "Laser scan micrometers" - Catálogo produto série LS-
3034.

- /28/ LASERMIKE INC. "183B Series Benchtop Optical Micrometers" - Catálogo
comercial.

- /29/ ZUMBACH "ODAC1 Ultra Fine Wire Gauge" - Data Sheet.

- /30/ MITUTOYO "Laser Scan Micrometer LSM series 544" - Operation Manual.
- /31/ ZYGO "1200 Series Laser Bench Micrometers" - Catálogo comercial.
- /32/ LÜDGE, W. "A new method of non-contacting wire size measurement"
JÄSCHKE, R. - IMEKO Proceedings, pg. 265, China, 1989.
HERZ, H.
GÜNTHER, K.
KLOSS, H. G.
- /33/ HARVEY, D. M. "Product inspection using real time analysis of optical
HOBSON, C. A. interference and diffraction patterns" - IMEKO III,
M. J. Proceedings, pg. 105, 1988.
- /34/ CIELO, P. "Optical inspection of industrial materials by
VAUDREUIL, G. unidimensional Fourier transform" - Applied Optics, Vol.
27, No. 22, 1988.
- /35/ KASDAN, H. L. "Electro-optical method for measuring gaps and lines" -
United States Patent, No. 3,937,580 Feb. 10, 1976.
- /36/ LIANGBI, B. "Studies on laser dynamic precision measurement of fine
FUYAO, C. wire diameters" - SPIE Vol. 1332, pg. 862, 1990.
SHIXIONG, W.
JIANGTONG, X.
ZHILIAN, G.
- /37/ SIEGEL, M. W. "Lasers and CCDs for flash measurement of small
diameters" - SPIE Vol. 730, pg. 119, 1986.
- /38/ OZKUL, C. "Processing of glass cylinder diffraction patterns scanned
LEBRUN, D. with a photodiode array: influence of the optical transfer
ALLANO, D. function of diodes on dimensional measurements" - Optical
IDRISSI, A. Engineering Vol. 30, No. 12, pg.1855, 1991.

- /39/ IIZUKA, K. "Engineering Optics" - Springer Series in Optical Science, No. 35, Springer Verlag, 1987.
- /40/ KERKER, M. "The scattering of light" - Academic Press, 1969.
- /41/ WOLF, E. "The Miyamoto-Wolf diffraction wave" - Progress in Optics Vol. IV, 1965.
- /42/ GOODMAN, J. "Introduction to Fourier Optics" - McGraw-Hill Book Company, 1968.
- /43/ HECHT, E. "Optics" - Addison-Wesley Publishing Company, 1979.
ZAJAC, A.
- /44/ HULST, H. C. "Light Scattering by Small Particles" - John Wiley & Sons Inc., 1957.
- /45/ WATKINS, L. S. "Scattering from side-illuminated clad glass fibers for determination of fibers parameters" - Journal of the Optical Society of America, Vol. 64, No. 6, 1974.
- /46/ DAS, P. "Lasers and Optical Engineering" - Springer-Verlag, New York Inc., 1991.
- /47/ VESPERINAS, M. "Scattering and Diffraction in Physical Optics" - Wiley-Interscience Publication, 1991.
- /48/ KELLER, J. B. "Geometrical Theory of Diffraction" - Journal of the Optical Society of America, Vol. 52, No. 2, pg. 116, 1962.
- /49/ SCHMIDT, S. "Ein Beitrag zur Erklärung der Lichtbeugung am metallischen Kreiszylinder" - PTB-Mitteilungen 86, 4/1976.
- /50/ BORN, M. "Principles of Optics" - Pergamon Press, 1965.
WOLF, E.

- /51/ GASKILL, J. D. "Linear Systems, Fourier Transform, and Optics" - John Wiley & Sons, 1978.
- /52/ YOUNG, M. "Optics and Lasers, Including Fibers and Integrated Optics" - Springer-Verlag, 1984.
- /53/ EG&G "Solid State Camera Products" - Catálogo 1991/92.
- /54/ SAVITZKY, A. "Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least
GOLAY, M. J. Squares Procedures" - Analytical Chemistry, Vol. 36, No. 8, 1964.
- /55/ GILBLOM, D. L. "Cameras for industrial sensing: this generation and the next" - SPIE Vol. 959, pg. 66, 1988.
- /56/ SVETKOFF, D. "A Comparison of Machine Vision Sensors" - SPIE Vol. 959, pg. 117, 1988.
- /57/ BENCKERT, L. "Fresnel diffraction of a Gaussian laser beam by polished
FORSBERG, L. metal cylinders" - Applied Optics, Vol. 29, No. 3, pg.416,
MOLIN, N. 1990.
- /58/ FELTZ, J. C. "Development of the modulation transfer function and contrast transfer function for discrete systems, particularly charge-coupled devices" - Optical Engineering, Vol. 29, No. 8, pg. 893, 1990.
- /59/ LANGLOIS, P. "Real-time curvature radii measurements using diffraction
LESSARD, R. edge waves" - Applied Optics, Vol.24, No. 8, pg. 1107,
BOIVIN, A. 1985.
- /60/ NIKON "Nikkor Lenses" - Catálogo de produtos 1991.
- /61/ DATA "Line Scan Processor Board - DT 2856" - User Manual,
TRANSLATION 1991.
- /62/ EG&G "Imaging Sensing Products" - Catálogo 1989.

- /63/ UEHARA, K. "New method of frequency stabilization of semi-conductor
KATAKURA, K. lasers" - IEEE 1988.
- /64/ LASERMAX "Visible Diode Laser - Series LAS" - Catálogo de
produto, 1991.
- /65/ ALBERTAZZI, A. "Medir 100 erros" - Apostila do LABMETRO, 1992.
- /66/ DALSA INC, "CL-C6-2048 High Sensitivity Line Scan Camera" -
Scanner News , 04/1992.
- /67/ EG&G "LC1902 - Modular Line Scan Camera" - Catálogo de
produto, 1991.
- /68/ MATHSOFT INC. "MathCAD - Version 2.5" - Manual de operação 1990.
- /69/ SCHENEIDER,C.A. "Técnicas de Pesquisa Experimental" - Apostila
LÜCKE, H.A LABMETRO CL-135, UFSC, 1990.
- /70/ INMETRO "Vocabulário de Metrologia" - Portaria INMETRO No.
102/88 - 10/06/1988.

ANEXO I

DEFINIÇÕES

- Irradiância - é definida como a potência total incidente sobre uma superfície dividida pela área dessa mesma superfície independentemente de sua orientação. A unidade da "Irradiância" é watts por metro quadrado (W/m^2) /52/.

- Sensibilidade de um fotodetector ou de um pixel é a fotocorrente (amperes) gerada por esses elementos por unidade de irradiância incidente sobre suas superfícies opticamente ativas. A unidade da sensibilidade é ampere/watt/metro quadrado ou coulomb/joule/metro quadrado /53/. A sensibilidade também é dependente do comprimento de onda da fonte de luz utilizada. Fatores multiplicativos, chamados de sensibilidade relativa, são utilizados para a correção da sensibilidade para diferentes comprimentos de onda .

- Exposição é definida como a irradiância multiplicada pelo tempo de integração. A unidade de exposição é joule por metro quadrado (J/m^2) /53/.

- Tempo de integração é o tempo no qual a carga elétrica gerada por um pixel é acumulada em um capacitor antes de ser adquirida por um circuito de varredura integrado ao CCD /9/.

- Faixa Dinâmica de um CCD é definida como a razão entre a tensão de saturação dos pixels e o ruído produzido pelos mesmos ($V_{SATURAÇÃO} / V_{RUIDO}$) /53/.